

Andrzej Burakiewicz

**PRZYCZEPNOŚĆ WŁÓKIEN DO MATRYCY
W KOMPOZYTACH FIBROBETONOWYCH**

42/1979

WARSZAWA 1979

Praca doktorska

Promotor: Doc.dr hab. A.M.Brandt

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 3 września 1979 r.

Zarejestrowana pod nr 42/1979



57213



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 190 egz. Ark.druk. 8,75. Ark.wyd. 6 .

Oddano do drukarni we wrześniu 1979 r.

Nr zamówienia 554/0/79

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul.Śniadeckich 8

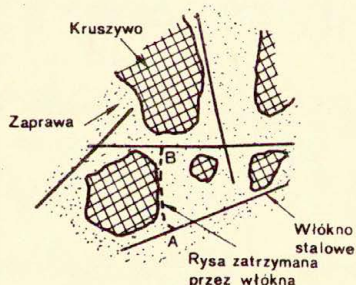
Andrzej Burakiewicz
Pracownia Pól Odkształceń

PRZYCZEPNOŚĆ WŁÓKIEN DO MATRYCY W KOMPOZYTACH FIBROBETONOWYCH

1. Wstęp

1.1. Cel i zakres pracy

Zadaniem uzbrojenia rozproszonego w matrycach kruchych jest powstrzymanie propagacji rys i częściowe przenoszenie sił wewnętrznych po zarysowaniu. Tam gdzie rysa została zatrzymana przez włókno, zapewnia ono zachowanie zespolenia materiału / rys.1.1./ Przekazywanie obciążeń z matrycy na włókno odbywa się dzięki przyczepności. Przez przyczepność rozumie się tutaj zespół zjawisk mechanicznych, fizycznych



Rys. 1.1. Mechanizm zatrzymywania rys w fibrobetonie [1.1]

i chemicznych, w wyniku których zachodzi współdziałanie poszczególnych faz kompozytu.

Zjawiska zachodzące między włóknem a matrycą mają zasadnicze znaczenie w mechanice kompozytów. Jakościowe i ilościowe ich poznanie konieczne jest do zrozumienia i ocenienia procesów zachodzących podczas zginania lub rozciągania fibrobetonu pod obciążeniami statycznymi jak i dynamicznymi. Praca poświęcona jest metodom badań i analizie zjawiska przyczepności włókien stalowych do matrycy cementowej.

Zagadnienia związane z obliczaniem i projektowaniem elementów zginanych i rozciąganych z fibrobetonu są obecnie tematem badań prowadzonych w Pracowni Pól Odkształceń /PPO/, dlatego też wyniki studiów autora są bezpośrednio przydatne i wykorzystywane do prac prowadzonych w PPO.

Podstawowym celem rozprawy było opracowanie właściwej metody badań przyczepności i analizy uzyskiwanych wyników doświadczalnych. W tym celu autor dokonał przeglądu dostępnej literatury na temat badań przyczepności w różnego rodzaju kompozytach. W rozdziale 2 zestawiono wnioski wynikające z tych badań. Badania przyczepności były i są prowadzone w kompozytach zarówno o matrycach cementowych /żelbet, strunobeton/, jak i bez-cementowych /kompozyty o matrycach metalicznych lub z tworzyw sztucznych/. Bezpośrednie stosowanie tych metod do fibrobetonu jest jednak niemożliwe, z uwagi na zasadnicze różnice jakie występują między wspomnianymi grupami kompozytów.

Przed wyborem i opracowaniem metody badawczej, konieczne było poznanie zjawisk zachodzących na styku włókno-matryca. W rozdziale 3 omówione są wyniki obserwacji mikroskopowej powierzchni włókna i matrycy. Rozdział ten oparty jest zarówno na dostępnych publikacjach jak i na przeprowadzonych w ograniczonym zakresie badaniach własnych autora.

Metody badania przyczepności w fibrobetonie, które są stosowane przez innych badaczy [1.2][1.3] - rozdział 4.1, nie są dostatecznie wszechstronne jak również w przypadku

dużych populacji włókien są trudne do zrealizowania. Poza tym wyniki prac jakie były uzyskiwane przez innych badaczy dotyczą materiałów /składników/ dość zasadniczo różniących się od tych jakie stosuje się w Polsce i dlatego materiały krajowe wymagają oddzielnych badań.

Autor opracował dwie metody badania przyczepności: przyczepności pojedynczych włókien i przyczepności w grupach - rozdziały 4.2 i 4.3. Metody te pozwalają na przeprowadzenie w sposób prosty dużej liczby powtarzalnych pomiarów wartości siły wyciągającej włókno z matrycy, w funkcji wielkości przemieszczenia szczęk maszyny wytrzymałościowej. Wyniki tych badań opracowano przy użyciu metod statystycznych. Metodologia badań została tak dobrana, że umożliwia wyselekcjonowanie i zbadanie poszczególnych parametrów wpływających na przyczepność.

Drugim celem rozprawy było jakościowe i ilościowe zbadanie przyczepności przy zastosowaniu opracowanych metod badawczych - rozdziały 5 i 6. Na podstawie analiz mikroskopowych opisanych w rozdziale 3 i badań innych autorów, dokonano wyboru najważniejszych parametrów i przeprowadzono badania przyczepnościowe około 2500 sztuk włókien. Każdemu badaniu odpowiadał wykres siły wyciągającej włókno P w funkcji przemieszczenia szczęk u . Przy tym sposobie rejestracji wyników, na podstawie ciągłej rejestracji siły, można obliczyć energię potrzebną do wyciągnięcia włókna, co daje dodatkowe informacje o zjawiskach jakie występują podczas niszczenia się fibrobetonu. Autor dużo uwagi poświęcił dyskusji prawdziwości metody pomiarowej i ocenie rozrzutów.

Kolejnym celem pracy była próba analitycznego opisanie zjawisk zachodzących na styku włókno-matryca - rozdział 7. Oparto się przy tym na analizie rozkładu naprężeń we włóknie i wzdłuż włókna przeprowadzonej przez Sokołowskiego [1.4]. Autor postanowił sprawdzić prawdziwość przyjętych założeń dotyczących rozkładu naprężeń na styku włókno-matryca. W pracach dotychczasowych /np.: [1.3] [1,5] / brak takich porównań,

ograniczały się one bądź jedynie do opisu zjawisk i podawania pewnych krzywych np. zależności siły wyrywającej od kąta nachylenia włókna, bądź też do dobierania wzorów na przyczepność do istniejących wykresów. Autor skonstruował pewien model zjawiska, który potem porównał z wynikami doświadczalnymi.

Ostatnim celem pracy jest porównanie korelacji wyników uzyskanych w badaniach przyczepności z parametrami wytrzymałościowymi elementów fibrobetonowych które były badane w PPO. Dotyczy to elementów badanych na zginanie i rozciąganie; wyniki tych porównań podane są w rozdziale 8. W rozdziale 9 autor zawarł analizę wniosków z badań i rozważań teoretycznych oraz uwagi o kierunkach i możliwościach prowadzenia dalszych prac.

Autor z konieczności musiał ograniczyć swoje poszukiwania do pewnych dziedzin. Przede wszystkim opracował i zbadał trafność przyjętej metodyki badań w świetle publikacji dotyczących fibrobetonu i innych kompozytów. Po opracowaniu i sprawdzeniu przyjętej metody badawczej ograniczono się do badania następujących parametrów wpływających na przyczepność włókien:

- wytrzymałości matrycy,
- objętościowy procent uzbudzenia matrycy,
- wiek matrycy,
- prędkość wyciągania włókien,
- kierunku wyciągania włókien względem kierunku betonowania,
- długości zakotwienia włókien,
- obróbka chemiczna włókien,
- obróbka mechaniczna.

Wyliczone parametry są najważniejszymi czynnikami, które mogą wpływać na przebieg zjawiska oraz na wielkość przyczepności. Odpowiedź na pytanie czy i jak na przyczepność wpływają długość zakotwienia, obróbka chemiczna i obróbka mechaniczna, mają m.in. podstawowe znaczenie przy ewentualnym podejmowaniu decyzji odnośnie krajowej produkcji włókna do fibrobetonu.

W swoich badaniach autor zajmował się jedynie przyczepnością włókien stalowych z drutu ciągnionego. Nie zajmowano się innego rodzaju włóknami stalowymi jak włókna wychłapywane /melt extract fibres/, skrawane, cięte z blachy, a także włókna z tworzyw sztucznych lub szkła. Jako matryca używana była zawsze zaprawa cementowa o współczynniku w/c = 0,5. Kruszywem był piasek wiślany /max średnica ziaren 2,0 mm/, a cement stosowano marki 250.

Badania wykonano przy użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Instron 1251. Umożliwia ona prowadzenie badań przy stałej prędkości przemieszczeń oraz pozwala dzięki wbudowanemu rejestratorowi na automatyczny i ciągły zapis siły w funkcji przemieszczenia.

Zestawienie opisujące wszystkie badane serie włókien podano w Załączniku 1.

1.2. Zestawienie podstawowych pojęć i definicji.

W niniejszym rozdziale zestawiono podstawowe pojęcia i definicje wraz z oznaczeniami stosowanymi w rozprawie. Bardziej szczegółowe omówienie niektórych pojęć znajduje się w dalszych rozdziałach.

Przyczepność - zespół zjawisk mechanicznych, fizycznych i chemicznych, w wyniku których zachodzi współdziałanie poszczególnych faz kompozytu.

Średnica włókna d - rzeczywista średnica włókna określana przy użyciu śruby mikrometrycznej; w przypadku włókna nagniatanego średnica mierzona jest na włóknie przed nagnieciem lub na odcinku gdzie nagniecia nie ma.

Średnica nominalna d_n - średnica podawana przez wytwórcę włókna.

Długość zakotwienia włókna l_z - długość odcinka, na którym włókno styka się z matrycą tzn. długość, na której odbywa się

przekazywanie obciążenia z włókna na matrycę.

Długość krytyczna włókna l_{cr} - taka długość zakotwienia, powyżej której włókno nie wywleka się z matrycy, ale w wyniku osiągnięcia naprężeń przekraczających wytrzymałość włókna ulega zerwaniu.

Pole styku włókna z matrycą A_s - pole boczne włókna, na którym zachodzi kontakt pomiędzy włóknem a matrycą.

Objętościowy procent uzbrojenia β - wielkość wyrażona w procentach określająca ilość objętościową włókien w matrycy.

Siła wyciągająca włókno P - siła jaka jest przenoszona z włókna na matrycę dzięki przyczepności.

Siła wrywająca włókno P_{max} - maksymalna siła wyciągająca, jaką rejestrowano w procesie wyciągania włókna.

Siła wyciągająca grupowa P - siła przenoszona z włókien na matrycę przez wszystkie włókna przechodzące przez sztuczną rysę w badaniu przyczepności grupowej.

Siła wrywająca grupowa P_{max} - maksymalna siła wyciągająca grupowa, jaką rejestrowano podczas badania grupowego wyciągania włókien.

Siła wyciągająca grupowa-jednostkowa P_g - siła przypadająca na jedno włókno przechodzące przez sztuczną rysę w badaniu przyczepności grupowej, obliczona przy założeniu równomiernego rozkładu naprężeń w przekroju próbki utworzonym przez sztuczną rysę.

Siła wrywająca grupowa-jednostkowa $P_{g,max}$ - maksymalna siła wyciągająca grupowa-jednostkowa jaką rejestrowano podczas badania grupowego wyciągania włókien.

Siła wyciągająca sprowadzona P_{gr} - jest to tak przekształcona wartość siły wyciągającej P , że możliwe jest porównanie wyników uzyskanych z badań, w których nie były zachowane stałe warunki badania a jeden z parametrów się zmieniał np. wytrzymałość lub wiek matrycy itp.

Napężenie przyczepnościowe τ_p - średnie napężenie ściągające w strefie połączenia włókna z matrycą, obliczane jako iloraz siły wyciągającej przez powierzchnię styku włókno-matrycy A_s .

Przyczepność nominalna τ - napężenie przyczepnościowe w chwili gdy siła wyciągająca włókno osiąga wartość siły wyrywającej.

Napężenie przyczepnościowe sprowadzone τ_{sp} - jest to tak przekształcona wartość napężenia przyczepnościowego τ_p , że możliwe jest porównywanie wyników uzyskanych z różnych badań, w których nie były zachowane stałe warunki badania a jeden z parametrów się zmieniał, np. wytrzymałość lub wiek matrycy itp.

Napężenie we włóknie G_f - napężenie rozciągające podczas wyciągania włókna wywołane działaniem siły wyciągającej P , przy założeniu równomiernego rozkładu naprężeń w przekroju włókna.

Wytrzymałość włókna f_t - napężenie rozciągające, przy którym włókno ulega zerwaniu w próbie bezpośredniego rozciągania.

Wytrzymałość matrycy f_m - napężenie rozciągające przy czystym zginaniu / zginanie 4-punktowe/, przy którym następuje zniszczenie beleczki próbnej.

Współczynnik poprawy przyczepności δ_c - stosunek aktualnej przyczepności nominalnej do przyczepności nominalnej porównawczej uzyskanej przy ustalonych warunkach badania.

Przemieszczenie włókna u - przemieszczenie swobodnego wystającego odcinka włókna przy wyciąganiu go z matrycy.

Energia wywleknięcia U - energia wyciągnięcia włókna z matrycy obliczona jako pole powierzchni pod krzywą $P \cdot u$ zarejestrowaną podczas badania.

Prace cytowane w rozdziale 1.

- 1.1. D.J. HANNANT - Steel fibre reinforced concrete Prospects for fibre reinforced constructional materials, Proc.of. Int. Building Exhb., 47-58, Olympia, London 24 November 1971.
- 1.2. R.C. de VEKEY, A.J. MAJUMDAR, Determinig bond strength in fibre reinforced composites, Magazine of Concrete Research, vol 20 nr 65, December 1968.
- 1.3. M. MAAGE, Hefteigenskapar mellom stalfibre og cement-pasta betong; Institut for Bygningsmaterialare, Universitet i Trondheim Norges Tekniske Hogskole November 1976.
- 1.4. M. SOKOŁOWSKI, On a one-dimensional model of the fracture process, Rozprawy inżynierskie, tom 25, zeszyt 2, 1977.
- 1.5. B.P. HUGHES, N.I. FATTUHI, Fibre bond strengths in cement and concrete, Magazin of Concrete Research, vol 27, nr 92 - 1975.

2. Zjawiska przyczepności w różnych materiałach kompozytowych.

2.1. Badania przyczepności w żelbecie i strunobetonie.

Zarówno żelbet jak i strunobeton są materiałami, które składają się z faz zróżnicowanych podobnie jak fazy w fibrobetonie, to znaczy z kruchej matrycy cementowej i uzbrojenia w postaci prętów czy drutów stalowych. Jednak jakościowo są to zupełnie inne materiały. Różnią się one tym, że średnica uzbrojenia w fibrobetonie jest kilkanaście do kilkadziesiąt razy mniejsza, jest ono nieciągłe oraz naogół równomiernie rozmieszczone w całej masie materiału.

Przyczepność w żelbecie i strunobetonie jest wynikiem szeregu zjawisk, które można sprowadzić do następujących trzech [2.1],[2.2] :

- adhezja fizyko-chemiczna,
- zazębienia mechaniczne,
- tarcie.

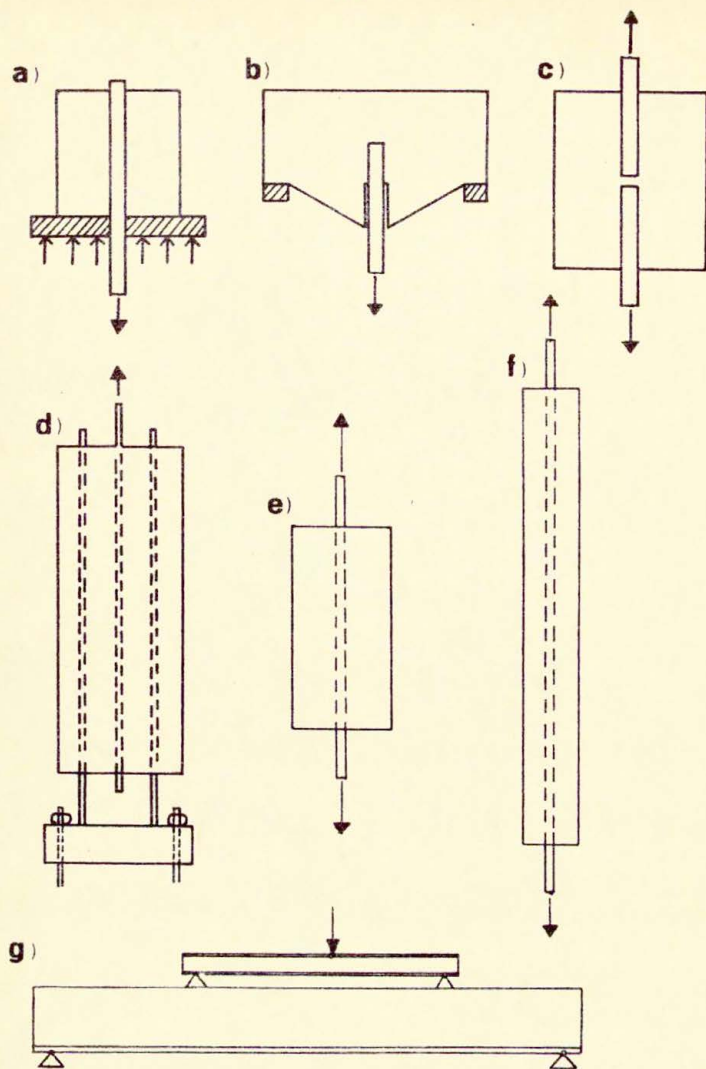
W początkowym okresie stosowania żelbetu uważano, że adhezja jest jedynym czynnikiem, który wiąże beton ze stalą za pośrednictwem więzów chemicznych jakie powstają na powierzchni pręta lub przez przyciąganie między molekularne. Więzy chemiczne występują rzeczywiście, czego dowodzą badania m.in. Czernienko [2.3.], ale mają one znaczenie przy odrywaniu betonu prostopadle do osi pręta, natomiast w kierunku równoległym a więc w tym, w którym działają siły wrywające pręt, nie odgrywają decydującej roli. Według badań Michajłowa [2.4.] szacuje się, że tylko około 10% siły przyczepności przypada na powiązania chemiczne i siły molekularne. Największe natomiast znaczenie mają zazębienia mechaniczne, które przenoszą według różnych autorów od 70 do 75% siły wrywającej. Dlatego też już od samego początku stosowania żelbetu pręty stalowe były specjalnie deformowane aby dzięki zwiększonej powierzchni ścinania uzyskiwały większą przyczepność.

Ostatni czynnik decydujący o przyczepności - tarcie pomiędzy stalą a betonem - objawia się wtedy, gdy następuje już przemieszczenie pręta stalowego względem otuliny betonowej. Zależy ono od siły nacisku normalnego betonu do pręta. Naprężenia normalne wywołane są przez skurcz w betonie i w zależności od wielkości tego skurczu wartość ich wynosi od 0,2 - 3,0 MPa [2.5]. Po uwzględnieniu, że współczynnik tarcia między betonem i stalą wynosi 0,3 do 0,5 daje to naprężenia przyczepnościowe wywołane tarcie od 0,06 do 1,5 MPa, co według badań Michajłowa [2.4] stanowi około 15 - 20% całej przyczepności. Nie wszyscy badacze jednakowo oceniają wpływ poszczególnych czynników na wielkość siły wyrwywającej, i np. Olszak [2.6.], uważa, że przyczepność jest uzależniona jedynie od tarcia i więzów chemicznych.

W początku XX wieku przeprowadzono szereg doświadczeń mających na celu określenie wielkości naprężeń przyczepnościowych [2.7.], lecz były one na ogół wyrwykowe i przeprowadzane na różnego rodzaju próbkach, tak że wyniki badań były trudne do porównywania. Pierwsze usystematyzowane badania zostały przeprowadzone w 1913 roku przez Abramsa, który najpierw mierzył wartości sił wyrwywających a następnie badał te same parametry w belkach zginanych, rejestrując ich przemieszczenia.

Do chwili obecnej nie ma żadnej znormalizowanej metody określania przyczepności prętów uzbrojenia do betonu, mimo licznych badań na ten temat. W roku 1957 w Sztokholmie zostało zorganizowane przez RILEM sympozjum na temat: "Przyczepność i formowanie się rys w żelbecie" [2.8.]. Przedstawione metody badawcze można podzielić na trzy grupy:

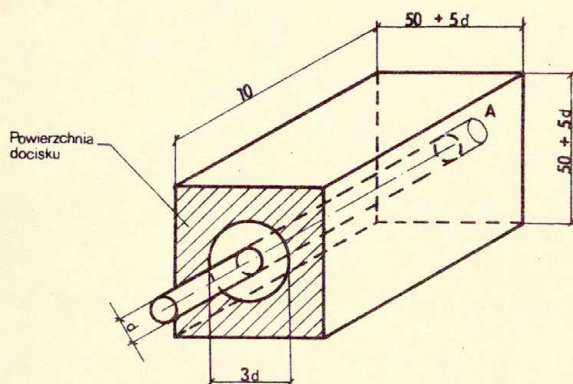
- Badania typu "pull-out", w których pręt poddany jest rozciąganiu a beton lokalnym naciskom, rys. 2.1 a,b.
- Badania typu "pull-out", w których pręty zabetonowane są na styk lub zakład, beton poddany jest również rozciąganiu, rys. 2.1. c.d.



Rys.2.1. Metody pomiarów przyczepności stalowych prętów zbrojeniowych do betonu stosowane w żelbetonie.
/objaśnienie w tekście/.

- badania oparte na obserwacji powstawania rys w próbce betonowej otaczającej pręt poddany rozciąganiu, /rys.2.1.e,f. próbka krótka i długa/

Badania typu "pull-out", jak na rys. 2.1.a, są nienajlepszym odzwierciedleniem rzeczywistego stanu naprężeń wokół pręta i w pręcie, ponieważ matryca jest poddana naprężeniu ściskającemu co powoduje powstanie sił wywołujących podwyższenie przyczepności. Taki schemat ma jednak zalety, wynikające z prostoty badań i łatwości rejestracji przemieszczenia pręta. Przy normalizacji tej metody można w sposób prosty porównywać pomiędzy sobą umowne wartości przyczepności.



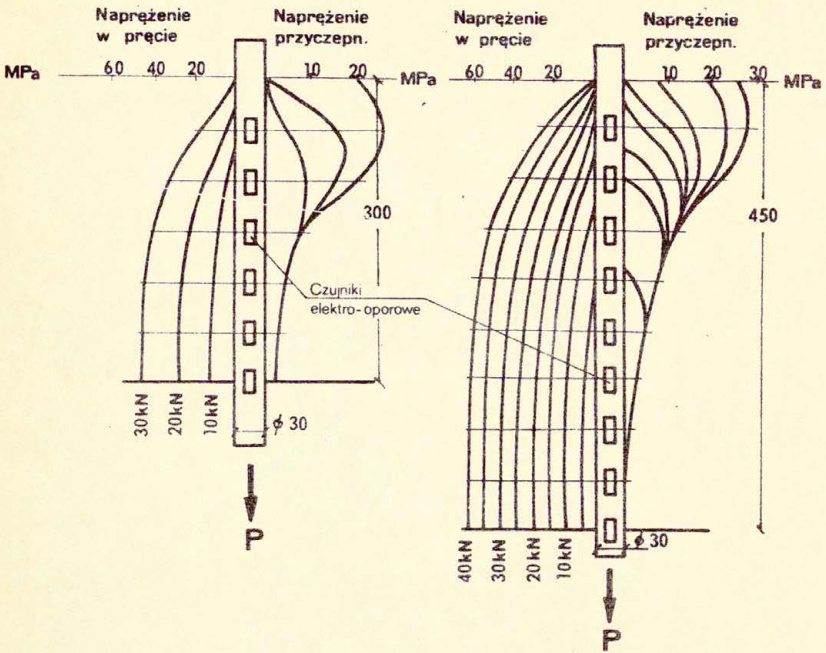
Rys.2.2. Propozycja standardowej próbki do badań przyczepności prętów w żelbecie.

Na rys. 2.2 przedstawiono standardową próbkę zaproponowaną przez Paduarta [2.9] do badania wartości siły wrywającej pręta stalowego z betonu. Przyjęto taką prędkość przyrostu obciążenia, aby naprężenia rozciągające w pręcie przyrastały z prędkością 30 MPa/min. Jako przyczepność określa się w tym badaniu średnią wartość naprężenia stycznego obliczoną z trzech wartości siły wrywającej pręt przy przemieszczeniach swobodnego końca pręta 0,1 mm, 0,25 mm i 1,00 mm,

Przy podawaniu wyników należy zamieszczać wszystkie dane dotyczące materiałów, z których została wykonana próbka, sposobu wykonania próbek, oraz dokładny opis przeprowadzenia badania. W ten sposób przedstawione wyniki mogą pozwolić na porównywanie rezultatów między poszczególnymi laboratoriami.

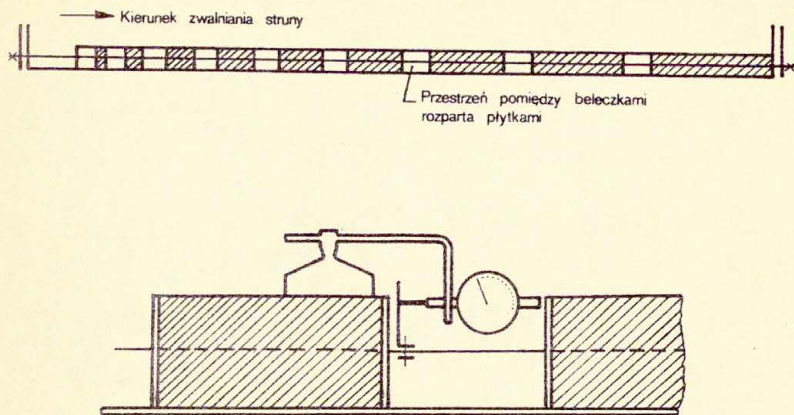
Rozkład naprężeń τ_p wzdłuż wymaganego pręta jest zagadnieniem ciągle nie w pełni rozwiązany. We wczesnych ujęciach z początku XX wieku rozkład ten przyjmowano jako prostokątny tzn. że zakładano $\tau_p = \text{const.}$ na całej długości pręta, co jest dużym uproszczeniem. Już pierwsze systematyczne badania doświadczalne np. Bacha [2.1.] pokazały, że jeżeli zmieniać długość zakotwienia to otrzymuje się różne wartości przyczepności. W latach 1947 - 51 Djabry [2.10] przeprowadził badania rozkładu naprężeń rozciągających w pręcie podczas badania wyciągania, przy wykorzystaniu tensometrów elektrooporowych /rys. 2.3./. Naklejenie tensometrów w kilku miejscach wzdłuż pręta pozwoliło na określenie rozkładu naprężeń rozciągających w pręcie a przez to pośrednio również i naprężeń przyczepnościowych. Interesujące jest stwierdzenie doświadczalne, że na całej długości zakotwienia naprężenia rozciągające pojawiają się dopiero od pewnej wartości siły. Drugą interesującą obserwacją jest to, że naprężenia rozciągające na części długości są stałe. Można stąd wnioskować, że na tym odcinku nastąpiło odspojenie pręta od matrycy i dopiero tam gdzie rozpoczyna się krzywoliniowa zmiana naprężeń pręt jest nadal zespolony z betonem.

Przyczepność w strunobetonie przebiega inaczej niż w żelbecie, gdyż na strunę po zwolnieniu naciągu działają ścis-kające naprężenia radialne. Dlatego też wielkość naprężeń przyczepnościowych i ich rozkład są odmiennie niż w badaniach żelbetu. Interesujące były badania Kajfasza [2.11], który wykonał tor naciągowy o długości 4,5 m /rys. 2.4./ służący do badania wielkości i rozkładu naprężeń przyczepnościowych. Naciąganie struny odbywało się mechanicznie, a naprężenia mierzono na podstawie wydłużenia struny. W torze naciągowym ustawiono formę o wymiarze poprzecznym 100 x 100 mm



Rys.2.3. Rozkład naprężeń w pręcie zbrojowym podczas wyciągania z betonu przy różnych poziomach sił [2.10].

i długości 4,10 m. Przez środek formy przebiegała struna, a uzyskana po zabetonowaniu beleczka była podzielona na części o różnej długości; podziału tego dokonywano wstawiając do formy blachy rozdzielcze rozparte poprzecznymi płytami. Badanie przeprowadzano w ten sposób, że powoli zwalniano naciąg w strunie aż do momentu gdy następowała utrata przyczepności w najkrótszej beleczce. Rejestrowano siłę, przy której nastąpiła utrata przyczepności i kontynuowano dalej zwalnianie naciągu aż do momentu utraty przyczepności w kolejnej beleczce. W ten sposób uzyskano rozkład



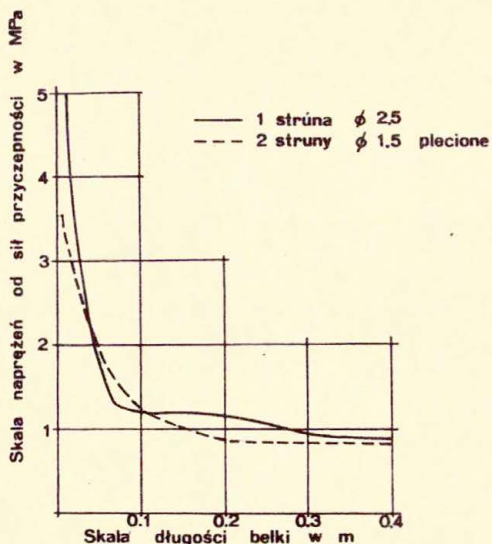
Rys.2.4. a/ Schemat badania przyczepności w strunobetonie
b/ Szczegół umocowania czujnika zegarowego sygnalizującego utratę przyczepności [2.11] .

naprężeń od sił przyczepności rys.2.5.

Oprócz bezpośrednich badań przyczepności strun do betonu prowadzone były także badania pośrednie wielkości i rozkładu naprężeń przyczepnościowych przez obserwacje odkształceń na powierzchni elementu strunobetonowego.

Do takich badań należały prace, które przeprowadził w latach 1954-58 Base [2.12] . Mierzył on za pomocą tensometru mechanicznego typu Demec odkształcenia na bocznych powierzchniach zginanych belek dwuteowych z betonu sprężonego. Metoda ta pozwalała na łatwą i nieniszczącą kontrolę rozkładu naprężeń na końcach elementów sprężonych, dzięki czemu mogła być stosowana do badania gotowych elementów, przeznaczonych do wbudowania w konstrukcję, a nie tylko do badań laboratoryjnych.

Opublikowane wyniki badań przyczepnościowych prętów i strun do zapraw i betonów cementowych określają dość dokładnie zarówno rozkład naprężeń we włóknie i przyczepnościowych,



Rys.2.5. Rozkład naprężeń od sił przyczepności w strunie wg. badań St.Kajfasza [2.11].

jak i wpływ różnych parametrów na ich wielkość. Bezpośrednie wykorzystanie tych wyników do oceny przyczepności włókien stalowych nie jest możliwe, ze względu na różnice dotyczące głównie:

- proporcji między średnicą uzbrojenia a wielkością elementów struktury zaprawy takich jak ziarna piasku, kryształki żeluz, pustki,
- stosunku długości zakotwienia do średnicy uzbrojenia,
- roli uzbrojenia w mechanizmie zarysowania i zniszczenia.

Z tych powodów, w przypadku kompozytów typu fibrobeton, konieczne jest opracowanie specjalnej metodyki badań a następnie przeprowadzenie badań doświadczalnych i prób analizy teoretycznej zjawiska przyczepności włókien do matrycy cementowej.

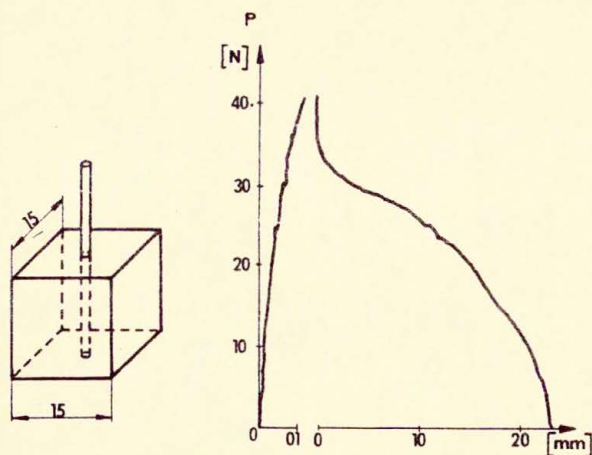
Natomiast z uwagi na podobieństwo zachodzących procesów możliwe jest występowanie pewnych analogii pomiędzy żelbetem, strunobetonem a fibrobetonem. Wykorzystane zostały także ogólne wnioski o rodzaju i znaczeniu poszczególnych parametrów.

2.2. Badania przyczepności włókna w kompozytach o matrycach bezcementowych.

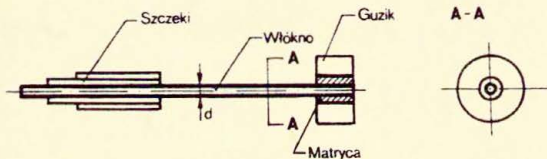
Podobnie jak w żelbecie i strunobetonie, istnieje szereg metod badania przyczepności włókien do matryc żywicznych czy metalowych. Metody te można podzielić na dwie grupy:

- badania bezpośrednie naprężeń przyczepnościowych przez wyciąganie włókien pojedynczych lub grup włókien,
- doświadczenia, w których pomiar naprężeń przyczepnościowych odbywa się w sposób pośredni.

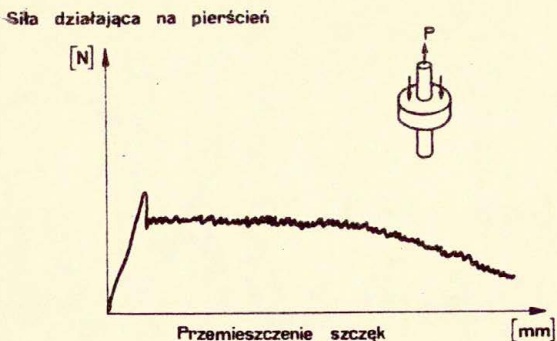
Badania pierwszego typu tzw. "pull-out" są stosowane najczęściej, ze względu na łatwość wykonania doświadczeń. Dobrym przykładem mogą być prace Takaku i Arridge [2.13.], którzy wyciągali włókno stalowe z matrycy epoksydowej. Próbkę, w których zakotwione były włókna, miały kształt prostopadłościanu o podstawie kwadratowej o boku 15 mm i zmiennej wysokości /rys. 2.6.a./, dzięki czemu istniała możliwość zmiany głębokości zakotwienia. Otrzymane wyniki badania były automatycznie rejestrowane w postaci krzywych obciążenie-przemieszczenie /rys.2.6.b/. Z uwagi na dobrą przyczepność w kompozytach o matrycach metalicznych często stosowane są badania "pull-out" na próbkach "guzikowych". Typowym przykładem takich badań są prace Jachie'go [2.14] oraz Kelly'go i Tysona [2.15], którzy badali przyczepność włókien z tungstenu do matrycy miedzianej, /rys. 2.7./, W celu określenia naprężeń przyczepnościowych nie tylko w chwili utraty przyczepności a również naprężeń od tarcia, stosowane są badania przeciągania pierścienia z matrycy wzdłuż włókna, rys.2.8.



Rys.2.6. Badanie przyczepności włókien stalowych do żywicy epoksydowej w Takaku i Arrige [2.13] .

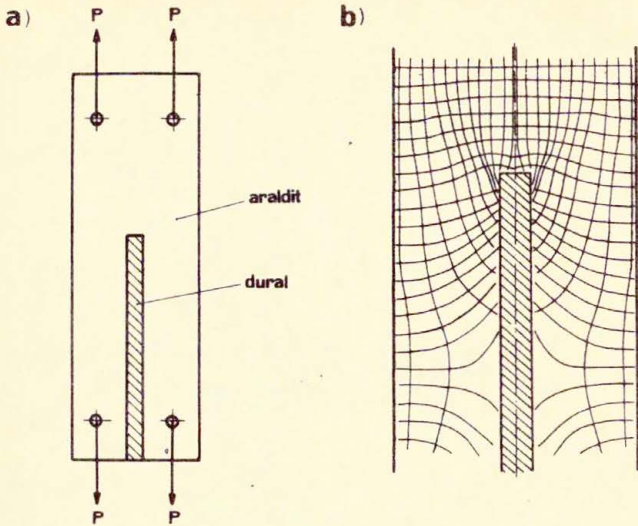


Rys.2.7. Badanie przyczepności tungstenu do matrycy miedzianej na próbce typu guzikowego [2.14].

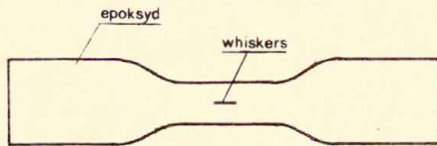


Rys.2.8. Badanie przyczepności wywołanej tarcieniem matrycy o włókno [2.14].

W drugim rodzaju badań naprężenia przyczepnościowe wyznaczone są przez mierzenie odkształceń zewnętrznych próbki kompozytowej przez pomiar jej wytrzymałości czy też stosując metody elastooptyczne. W przypadku badania kompozytów o matrycach żywicznych łatwo jest zastosować metody elastooptyczne. Tak np. Thyson i Davis [2.15] badali rozkład naprężeń wokół włókna aluminiowego zatopionego w żywicy aralditowej /rys.2.9.a/. Płytę, w której był zatopiony pręt aluminiowy poddawano rozciąganiu osiowemu a następnie fotografowano. W wyniku badania uzyskano wykresy rozkładu naprężeń statycznych przy różnych poziomach naprężeń rozciągających, /rys.2.9.b/ Podobne badania dotyczące przyczepności szafirowego whiskera do żywicy epoksydowej prowadzili Schuster i Scala [2.15]/rys. 2.10/



Rys.2.9. Schemat badania rozkładu naprężeń wokół włókna duraluminiowego w matrycy aralditowej [2.15].



Rys.2.10. Badanie przyczepności whiskersa szafirowego do matrycy epoksydowej [2.15].

Polegały one na rozciąganiu próbki wioreczkowej z zatopionym w środku whiskerem. Rejestracja rozkładu naprężeń odbywała się również przez robienie zdjęć w świetle spolaryzowanym.

Przedstawione metody nie mogą być stosowane bezpośrednio do badań w fibrobetonie, pośrednio można wykorzystać jedynie badania elastooptyczne, dzięki którym przy odpowiednim doborze modułów sprężystości badanych włókien i matrycy można obserwować zjawiska zachodzące na styku włókno-matryca.

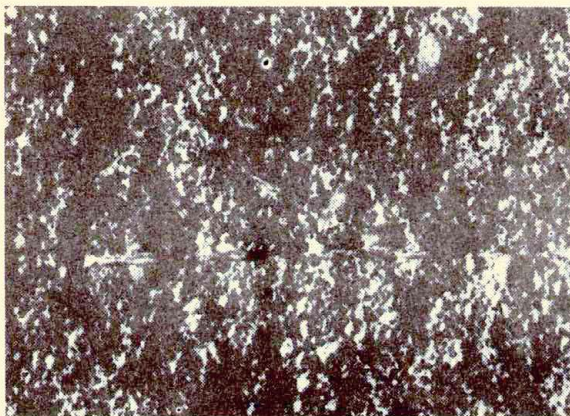
Prace cytowane w rozdziale 2.

- 2.1. Z. CZERSKI - Współpraca stali z betonem w strunobetonie, Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej nr 36, 1966.
- 2.2. L.A. LUTZ, P. GERGELY - Mechanics of bond and slip of Deformed Bars in Concrete, Journal of ACI, November 1967 nr 11.
- 2.3. D.M. CZERNIENKO - Przyczepność zaczynu cementowego do kruszywa i stali w betonie i żelbecie, Materiały Budowlane 5/1957
- 2.4. К.В. МИХАЙЛОВ - Спелление арматуры с бетоном, Москва 1952.
- 2.5. L. SUWALSKI - Teoria betonu i żelbetu, Arkady 1964
- 2.6. W. OLSZAK, S. KAUFMAN, Cz. EIMER, R. BYCHAWSKI Teoria konstrukcji sprężonych, Warszawa 1961
- 2.7. B. BRESLER, Reinforced concrete engineering, vol 1 Materials, structural elements, safety, John Wiley and Sons - 1974.
- 2.8. RILEM - Symposium on bond and crack formation in reinforced concrete, Stockholm 1957, Vol IV,
- 2.9. RILEM - Symposium on bond and crack formation in reinforced concrete. Stockholm 1956 - Vol III.
- 2.10. W. DJABRY - Contribution à l'étude de l'adhérence des forces d'armature à béton, Zürich 1952.
- 2.11. St. KAJFASZ - Zagadnienie przyczepności w żelbecie i strunobetonie, Inżynieria i Budownictwo nr 9, 1953
- 2.12. G.D. BASE - An investigation of transmission length in pre-tensioned concrete, Cement and Concrete Association, Research Report 5 1958.

- 2.13. A. TAKAKU, R.G.C. ARRIDGE, The effect of interfacial radial and shear stress on fibre pull-out in composite materials. I.Phys D. Appl.Phys. Vol 6 1973, str. 2038 - 2047.
- 2.14. C.C. CHANIS, Mechanics of load transfer of the interface, I.Lawrence, R.Brautman, H.Koch, Composite Materials vol 6 str. 31-77, Academic Press, New York 1974.
- 2.15. G.S. HOLISTER,C. THOMAS - Fibre Reinforced Materials, Elsevier Publishing Co Ltd Amsterdam 1966.

3. Badania mikroskopowe styku włókno-matryca w fibrobetonie.

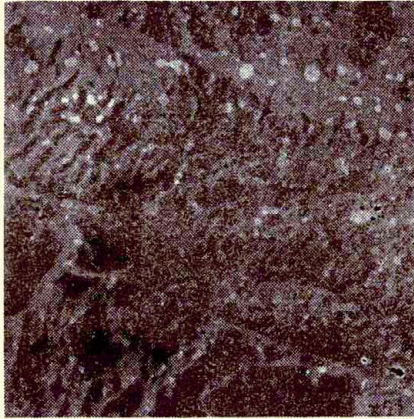
Naturalną i obiektywną metodą poznania co dzieje się na styku włókno-matryca jest wzrokowa obserwacja tej strefy tak ważnej dla mechaniki całego kompozytu. Już obejrzenie okiem nieuzbrojonym śladu po wyciągnięciu włókna stalowego z zaprawy na zdjęciach wykonanych przez autora /rys.3.1./, pozwala na wyjaśnienie przyczyny dużych rozrzutów w wartości siły wrywającej włókno.



Rys.3.1. Przykład zdjęcia przełamanej próbki z badań przy-
czepnościowych wykonywanych przez autora; widoczny
ślad po wyciągnięciu włókna.

Na całej długości zakotwienia włókna występują liczne pory, których średnica przekracza kilka razy średnicę włókna. Wpływa to oczywiście w sposób zasadniczy na wielkość siły wrywającej i na jej rozrzut tak, że tylko przez dużą liczbę badań można uzyskać mierodajne wyniki i starać się o wyciągnięcie wniosków o czynnikach decydujących o przyczepności. Przy

większym powiększeniu /x 51/ śladu pozostawionego po poziomym włóknie /rys.3.2/ [3.1.] widać, że oprócz dużych porów na całej powierzchni styku włókno-matryca, występuje również

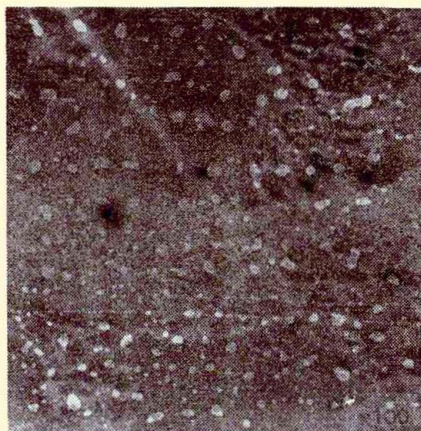


Rys.3.2. Powiększenie śladu pozostawionego po poziomo leżącym włóknie [3.1.].

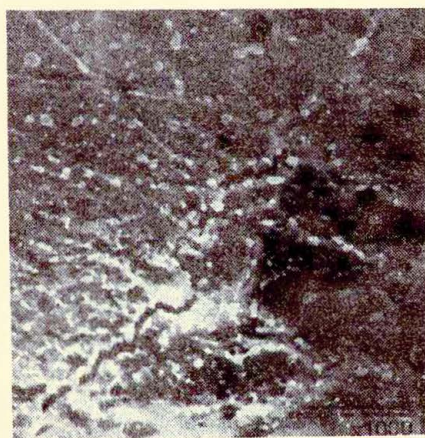
siatka pustek wywołanych wypłukaniem cementu przez wodę. To również obniża przyczepność między włóknom a matrycą. Przy obserwacji powierzchni włókna wokół jego obwodu na rys 3.3.a [3.1.] można przy dużych powiększeniach np. 1000-krotnych rys.3.3.b [3.1.] zauważyć oprócz porów rysę, jaka występuje na styku włókno-matryca, a której pojawienie się jest zapewne wywołane skurczem matrycy podczas dojrzewania. Taka rysa skurczowa po obwodzie całego włókna znacznie obniża przyczepność włókna do matrycy a podczas obciążania siła przekazywana jest na włókno jedynie przez tarcie.

W celu zbadania i poprawienia przyczepności prowadzone były próby obróbki chemicznej włókien stalowych, jak odtłuszczenie, rdzewienie, trawienie powierzchni włókien kwasami, pokrywanie włókien metalami lub żywicami itp. Obserwacje włókien oraz śladów po wyrwanych włóknach pod mikroskopem pozwalają

a)

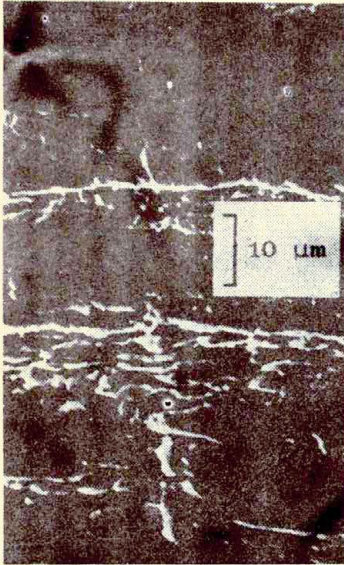


b)

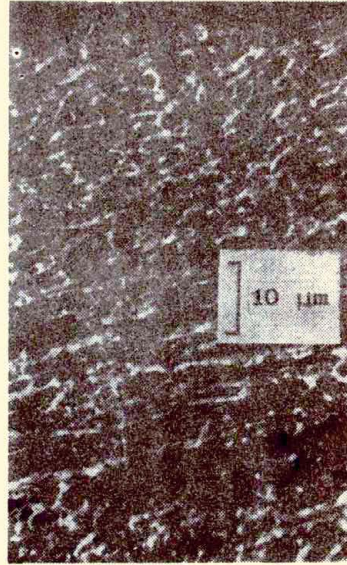


Rys.3.3. Zdjęcie szlifu przekroju fibrobetonowego prostopadłego do osi włókna; a/ powiększenie 100-krotne, widoczny cały przekrój włókna; b/ powiększenie 1000-krotne tego samego wycinka, widoczne rysa na styku włókno-matryca [3.1.]

a)



b)



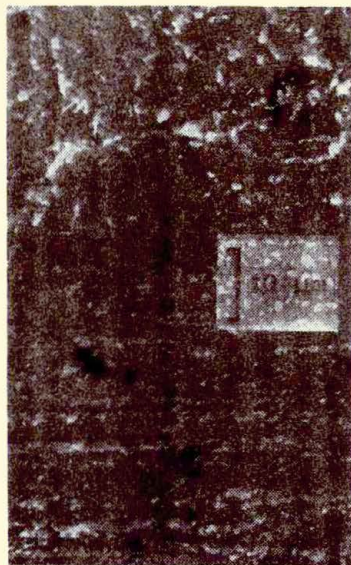
Rys.3.4. a/ Zdjęcie mikroskopowe włókna odtłuszczonego acetonem,
b/ Zdjęcie mikroskopowe włókna wytrawionego w rozcieńczonym kwasie solnym, powiększenie 1300-krotne [3.2.]

na interpretacje wyników uzyskanych w badaniach wpływu tych typów obróbki na przyczepność. Na rys. 3.4.a widać powierzchnię włókna odtłuszczonego acetonem: można zaobserwować charakterystyczne rysy na powierzchni włókna. Po wytrawieniu w rozcieńczonym kwasie solnym powierzchnia włókna ma bogatszą fakturę /rys.3.4.b/, mimo to jak wykazują badania [3.2.] i [3.3.] nie obserwuje się przyrostu przyczepności. Podobnie w przypadku wyżarzenia włókien powodującego rdzewienie powierzchni włókna /rys.3.5.a/ mimo bogatszej rzeźby włókna nie zauważono polepszenia przyczepności a nawet stwierdzono jej obniżenie [3.4.]. Było to zapewne spowodowane słabą przyczepnością do stali łusek rdzy pozostałych w wyniku utlenia-

a)

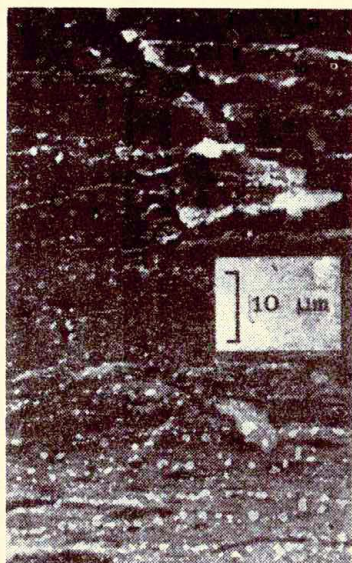


b)



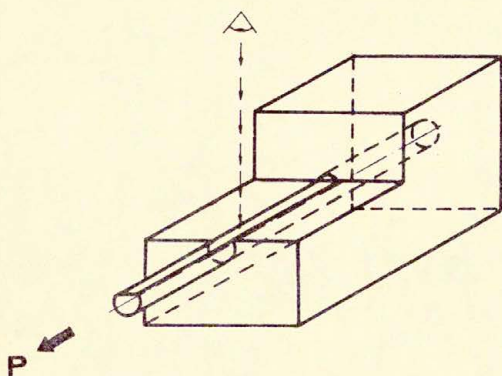
Rys.3.5. a/ Zdjęcie mikroskopowe powierzchni włókna wyżarz-
nego,
b/ Zdjęcie mikroskopowe śladu po włóknie wyżarzonym,
powiększenia 1300-krotne [3.2].

nia się wierzchniej warstwy włókien, co widoczne jest na rys. 3.5.b. Widać tam na śladzie zostawionym przez włókno płytki z tlenków żelaza. Pokrywanie włókien stalowych miękkimi metalami jak np. miedź czy cynk, powoduje poprawę przy-
czepności [3.4.], [3.5] prawdopodobnie dlatego, że miękka warstwa w sposób łagodny przenosi naprężenia z włókien na matrycę. Na rys. 3.6. widać ślad po wyciągnięciu włókna pokrytego cynkiem. Widać, że cynk został zdarty z włókna co świadczy o lepszej przy-
czepności między cynkiem a betonem niż między cynkiem a stalą.

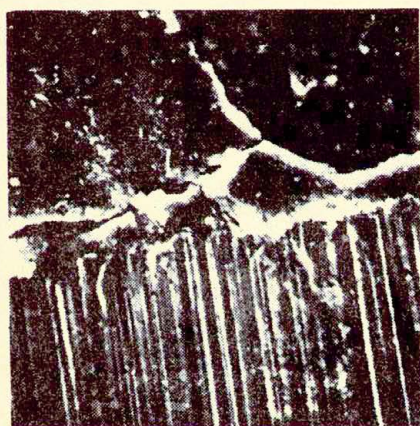


Rys.3.6. Ślad po wyciągnięciu włókna pokrytego cynkiem, powiększenie 1300 krotne [3.2].

Badania styku włókno-matryca przynoszą także wiadomości o sposobie niszczenia i mechanice fibrobetonu. Pinchin i Tabor [3.6] obserwowali styk włókno-matryca/rys.3.7, pod elektronowym mikroskopem skaningowym. Na rys. 3.8, widać, że rysa powodująca utratę przyczepności powstaje nie na styku włókna z matrycą a w samej matrycy w odległości około 5 μm od powierzchni włókna. Oznacza to, że włókno wyciągane jest z matrycy w otoczce z zaczynu cementowego. Ta obserwacja wyjaśnia od razu dlaczego obróbka chemiczna nie wpływa na polepszenie przyczepności włókna do matrycy: niezależnie od tego jakie drut ma mikrowgłębienia, zawsze odepaja się w otulinie z zaczynu cementowego, na którego wytrzymałość obróbień włókna nie ma wpływu. Dopiero znaczne mikroskopowe zdeformowanie włókien powoduje jakościowe zmiany przebiegu



Rys.3.7. Schemat badania obserwacji styku włókno-matryca podczas procesu odspajania [3.6].



matryca

włókno

Rys.3.8. Zdjęcie styku włókno stalowe - zaczyn cementowy podczas powstawania rysy [3.6].

zjawisk i znaczny przyrost siły wyrywającej włókno.

Reasumując na podstawie obserwacji mikroskopowych można stwierdzić, że:

- włókno w matrycy otoczone jest licznymi makro i mikro porami; wywołane są one przez bąbelki powietrza i przez wypłukiwanie mleczka cementowego otaczającego włókno przez wodę,
- obróbka chemiczna włókien zmienia chropowatość powierzchni, ale nie wpływa na poprawę przyczepności włókno-matryca,
- rysa powstająca podczas odspojenia włókna od matrycy pojawia się w odległości około 5 μ m od powierzchni włókna.

Powyższe jakościowe wnioski nie mogą zastąpić właściwych badań prowadzonych z zachowaniem warunków niezbędnych do uzyskania wyników ilościowych. Widać jednak, że w badaniach takich można spodziewać się znacznych rozrzutów. Prawidłowe rezultaty uzyskać więc można przez:

- możliwie daleko posunięte ograniczenia zmienności warunków badań,
- wysoką dokładność pomiarów i właściwą ocenę błędów,
- badanie zbiorów próbek o dużej liczebności z opracowaniem statystycznym wyników.

Badania autora przedstawione w rozdziałach 5 i 6 prowadzone były zgodnie z tymi wnioskami.

Prace cytowane w rozdziale 3.

- 3.1. B.P. HUGHES, N.J FATTUHI Load - deflection curves for fibre - reinforced concrete beams in flexure, Mag. of Concrete Research, vol 29, No 101. December 1977.
- 3.2. B. MAYFIELD, B.ZELLY. Steel fibre treatment to improve bonds, Concrete vol 7, nr 3 1973.
- 3.3. A. BURAKIEWICZ. Bond strength tests for fibre reinforced concrete elements. I Narodowa konferencja na temat: Mechaniki i technologii materiałów kompozytowych, 14-16 IX 1976, Warna, Bułgaria.
- 3.4. M. MAAGE - Hefteigneskaper mellom stålfibre og cementpasta, betong, Institut for Bygningsematerialeer, Universitet i Trondheim Norges Tekniske Høgskole, November 1976.
- 3.5. G.H. TATTERSALL, C.R. URBANOWICZ. Bond strength in steel - fibre - reinforced concrete. Magazin of Concrete Research, vol 26 nr 87 june 1974.
- 3.6. P.J. PINCHIN, D. TABOR, Mechanical properties of the steel cement interface, some experimental results, RILEM Symposium London 1975 vol 2.

4. Metodologia badań przyczepności włókien stalowych do matrycy betonowej.

4.1. Opis metod stosowanych do badania przyczepności włókien w fibrobetonie.

Badania przyczepności włókien w fibrobetonie, podobnie jak to miało miejsce w przypadku innych kompozytów /rozdział 2/, można podzielić na dwie grupy:

- badania bezpośrednie,
- badania pośrednie.

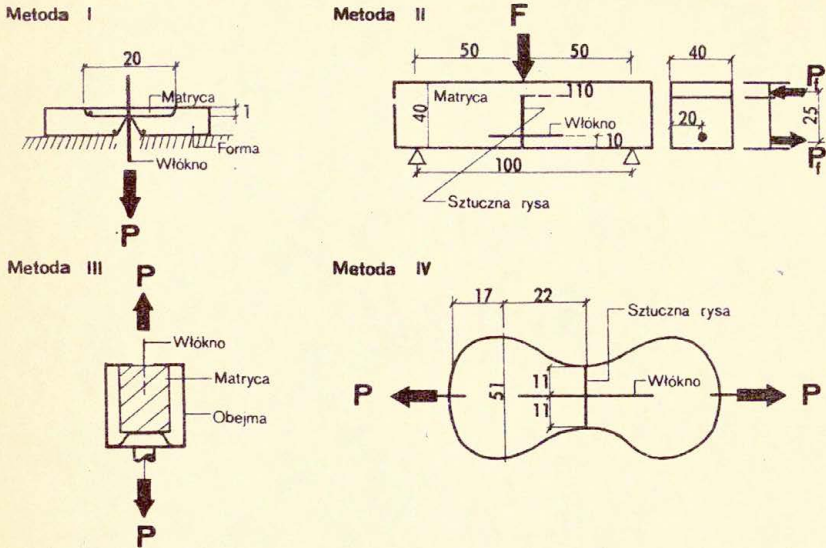
Badania bezpośrednie obejmują badania przyczepności pojedynczych włókien i badania przyczepności grup włókien.

Badania pośrednie, to w przypadku fibrobetonu porównywanie odkształcalności i wytrzymałości elementów fibrobetonowych uzbrojonych włóknami o różnych przyczepnościach. W niniejszej pracy ta grupa badań nie została przedstawiona. Autor zajmuje się nią wraz z innymi badaczami z PPO, prowadząc pomiary wytrzymałości i odkształcalności elementów fibrobetonowych poddanych zginaniu i bezpośredniemu rozciąganiu.

Bezpośrednie badania przyczepności pojedynczych krótkich włókien prowadzone są różnymi metodami, które można podzielić na cztery główne rodzaje /rys.4.1./

Metoda I to badanie przyczepności przez przeciąganie włókna stalowego przez płytkę okrągłą o niewielkiej grubości/np. 1 mm/ wykonaną z zaprawy cementowej. Stosowali tę metodę de Vekey i Majumdar [4.1.], badając przyczepność włókna szklanego typu "E" i włókna stalowego do matrycy z cementu portlandzkiego i żywicy poliestrowej. Ograniczyli się oni jedynie do porównywania uzyskanych wyników dotyczących różnych włókien.

Technika tego badania jest jednakże trudna, gdyż łatwo uszkodzić próbki podczas przygotowywania i umieszczania ich w uchwytach maszyny wytrzymałościowej, która musi być sztyw-



Rys.4.1. Typy badań przyczepności włókien do matrycy w fibrobetonie.

na i równocześnie czuła, gdyż siły zrywające przyczepność są bardzo małe. Istotne ograniczenia tej metody wynikają stąd, że warunki badania różnią się znacznie od zjawisk zachodzących w fibrobetonie. Matrycą jest zaczyn cementowy, a nie zaprawa lub drobny beton. Nie ma ponadto możliwości badania wszystkich rodzajów włókien, np. włókien zdeformowanych mechanicznie na całej długości, takich jak Duoform, czy włókien z haczykami na końcu /Bekaert/. Niemożliwe jest również stwierdzenie wpływu kąta nachylenia ani procentu uzbrojenia matrycy. Metoda ta bezpośrednio adaptowana z badań przyczepności włókien do matryc metalicznych /rys.2.7./ nie nadaje się najlepiej do badań w dziedzinie fibrobetonu.

Metoda II polega na zginaniu beleczek ze sztuczną rysę przez którą przechodzi pojedyncze włókno. Rozmiary beleczek, głębokość rysy i położenie badanego włókna są tak dobrane, że siła we włóknie jest równa sile przykładanej do beleczki $F = \bar{F}$. W badaniach prowadzonych według tego schematu włókno znajduje się w warunkach zbliżonych do występujących w rzeczywistym elemencie fibrobetonowym jednak rejestrację siły we włóknie można prowadzić jedynie pośrednio co może dawać mylące wyniki odnośnie przyczepności, obciążone różnymi nieokreślonymi czynnikami. Po rozwarciu rysy włókno wyciągane jest nie wzdłuż prostej a przechodzi przez krawędzie rysy pod kątem wzrastającym wraz z siłą, co wpływa dodatkowo na mierzoną wartość przyczepności. Metoda ta była wprowadzona przez Maage'ego [4.2.] ale bez przekonujących rezultatów, co skłoniło go do zrezygnowania z jej stosowania.

Metoda III określana nazwą próby "pull-out", polega na wyciąganiu pojedynczego włókna z matrycy. Jest to metoda niewątpliwie najprostsza ze względu na przygotowanie próbek i na przeprowadzenie badań. Próbki mogą zawierać jedno włókno lub wiele włókien, które są wyciągane kolejno. Łatwo oddzielić tu poszczególne badane parametry oraz dowolnie zmieniać je lub grupować. Wadą tej metody jest to, że włókno tylko z jednej strony znajduje się w matrycy, podczas gdy z drugiej strony uchwycone jest stalowymi szczękami, a więc jest to stan odmienny od rzeczywistej sytuacji w elemencie fibrobetonowym, gdzie włókno jest zawsze obustronnie zakotwione w matrycy. Metoda ta była stosowana np. przez Maage'go [4.2.], Ohigashiego [4.3.] , Pinchina [4.4.] i Takagi [4.5.], przy czym sposoby badania różniły się między sobą szczegółami wykonania próbek i obciążania włókien.

Metoda IV pozwala na usunięcie wspomnianej wady metody III. Włókno znajduje się w próbce ósemkowej przedzielonej na środku sztuczną rysę, a obie połówki próbki połączone są jedynie włóknom. Próbki ósemkowe stosowali między innymi Maage [4.2.] i Dehousse [4.6.] , natomiast podobne próbki prostopadłościennie wykorzystywane były w badaniach Hughes'a i

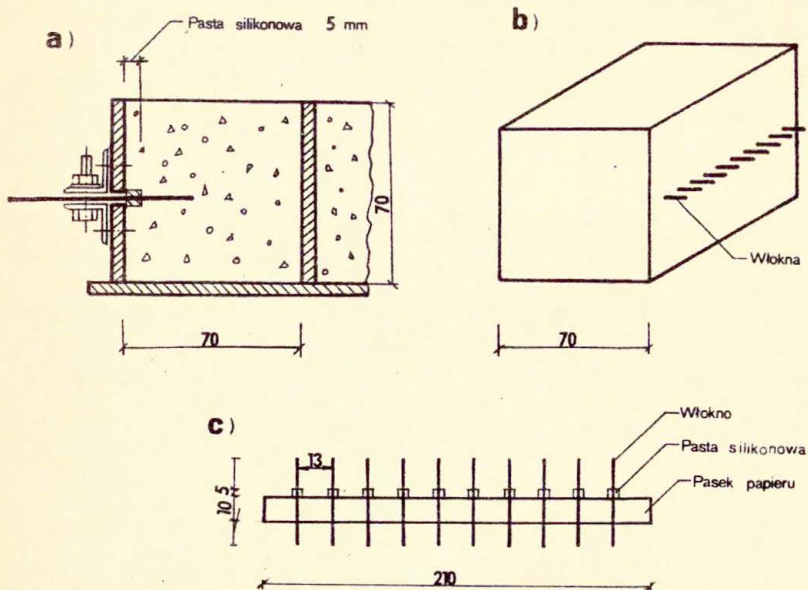
Fattuhi'ego [4.7.], a także Shah'a i Stroevena [4.8.] Badania prowadzone według metody IV mają tę dodatkową zaletę, że jedna połowa próbki może być wykonana z materiału elastooptycznego, co pozwala na uzyskanie dodatkowych wiadomości między innymi o rozkładzie naprężeń wzdłuż włókna. Ta metoda stosowana jest również przy badaniach grup włókien i wtedy zamiast pojedynczego włókna w sztucznej rysie umieszczonych jest kilka lub kilkanaście włókien łączących obie połowki próbek i poddawanych badaniu łącznie [4.7.]. Trudność metody stanowi konieczność zapewnienia sztywnego połączenia obu części próbek podczas dojrzewania matrycy i umieszczenia próbki w maszynie wytrzymałościowej. Połówki próbki połączone są bowiem jedynie włóknem i podczas manipulacji próbką może łatwo nastąpić przypadkowe zerwanie przyczepności pomiędzy włóknem a matrycą. Metoda IV pozwala na najwierniejszą realizację rzeczywistych warunków w jakich znajduje się włókno w matrycy cementowej, jednak do każdego włókna wymagana jest oddzielna próbka z oddzielnym układem usztywniającym ją aż do chwili badania. Aby można było uzyskać miarodajne wyniki dotyczące jednego parametru, konieczne jest więc wykonanie kilkunastu lub kilkadziesiątu eksperymentów. Prowadzi to do wykonania takiej samej liczny próbek, co z kolei może powiększać rozrzuty wyników spowodowanych innymi czynnikami jak np. naturalną różnicą wytrzymałości badanych próbek.

Jak wynika z powyższych uwag do badania przyczepności między matrycą cementową a włóknem stalowym najlepiej nadają się metody III i IV na rys. 4.1.

Metoda III lepiej odpowiada badaniom licznych pojedynczych włókien, natomiast badania grup włókien dogodniej jest prowadzić według schematu metody IV. Wniosek ten wykorzystano w przedstawionych w niniejszej pracy badaniach autora przy czym obie metody zostały w znacznym stopniu zmodyfikowane i ulepszone, aby umożliwić swobodne zmienianie badanych parametrów i uzyskanie spójnych wyników.

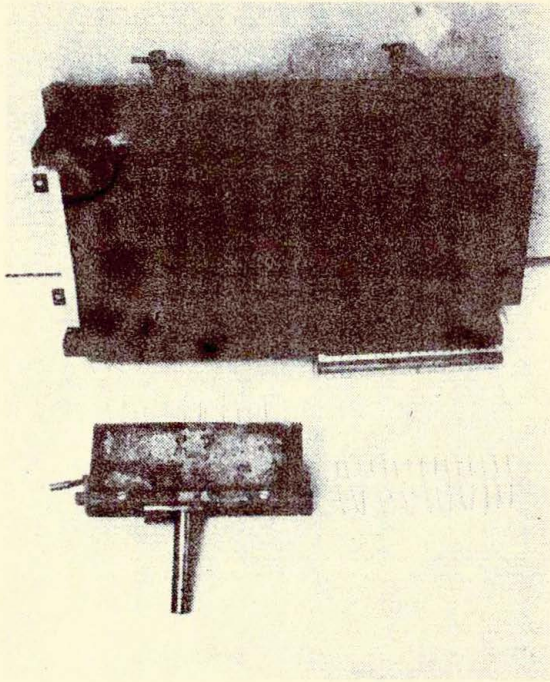
4.2. Opis przyjętej metody badania przyczepności pojedynczego włókna.

Na rys. 4.2. pokazano rozwiązanie konstrukcji formy do wykonania próbek oraz próbkę do badania przyczepności pojedynczych włókien. Do wykonywania próbek adaptowano istniejące formy bateryjne do betonowych próbek na zginanie w postaci beleczek 70 x 70 x 210 mm /rys. 4.3./. Dysponowano dwiema formami, z których każda pozwalała na jednoczesne wykonanie czterech próbek. Z jednego zarobu można było więc wykonać serię 8 próbek zawierających od 10 do 15 włókien, co pozwalało na przebadanie w określonych warunkach do 120 włókien. Aby można było umieścić włókno w próbce tak żeby je unieruchomić na czas betonowania i zapewnić stałą długość zakotwienia, istniejące formy zostały przerobione w ten sposób, że ścianki form składały się z dwu części rys.4.2.b. Przeznaczone do zabetonowania w jednej próbce włókna przylepiano do paska papieru rys. 4.2.c. Następnie włókna odtłuszczano przy użyciu toluenu. Aby w pomiarze uniknąć zakłóceń wywołanych efektami przyściennymi i możliwością wypłukania mleczka cementowego przez szparę w boku formy, przez którą przechodziły włókna, wszystkie włókna na odcinku 5 mm od ścianki w głąb próbki pokrywano środkiem antyadhezyjnym. W wyniku prób stwierdzono że najlepiej do tego celu nadaje się pasta silikonowa, dzięki której nawet włókna o długości 30 mm pokryte tą pastą są wyciągane z próbki betonowej przy sile praktycznie równej zeru. Po zapełnieniu formy do połowy wysokości rys.4.4.a, pasek z przyklejonymi włóknami układano na brzegu połówki ścianki formy, rys. 4.4.b, następnie przykładano drugą połówkę formy i dopełniano całkowicie zaprawą /rys. 4.4.c/. We wszystkich badaniach stosowano ten sam typ zaprawy o składzie: cement portlandzki marki "250" 5,0 kg, piasek wiślany 12,7 kg, woda 2,5 l - stosunek w/c = 0,5. Wibrowanie próbek przeprowadzono na znormalizowanym stoliku Ve-Be dwukrotnie po 30 sek.

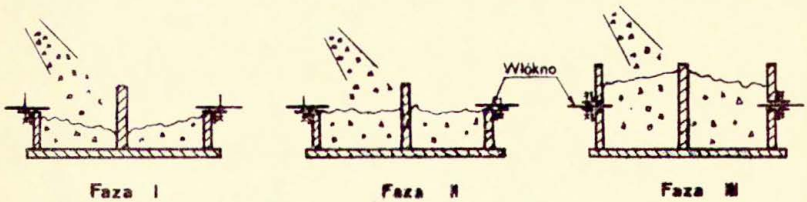


Rys.4.2. Próbkę do badania przyczepności pojedynczych włókien;
a/ przekrój poprzeczny formy do wykonywania próbek,
b/ próbka po zabetonowaniu, c/ pasek papieru z przyklejonymi włóknami, przygotowanymi do zabetonowania w próbce.

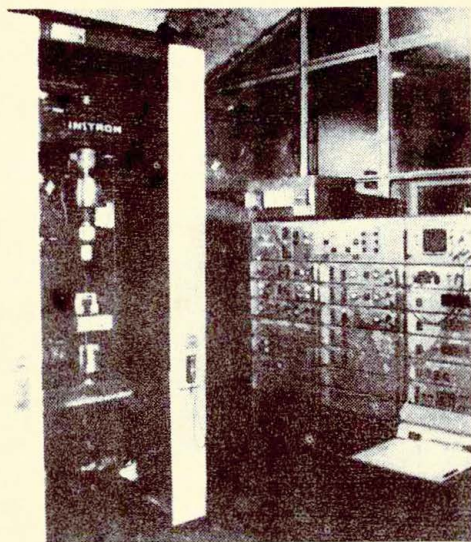
Próbki zostawiono w formach przykrytych mokrymi szmatami na 24 godziny, następnie wyjmowano z form i umieszczano w wannach z wodą. Po upływie tygodnia od chwili wykonania próbek, były one wyjmowane z wody i do czasu badania trzymane w pomieszczeniu o stałej wilgotności 70% RH i temperaturze 18°C. Badania przyczepności wykonywano po 28 dniach od chwili zabetonowania. W czasie przechowywania próbek w wodzie swobodne końce włókien stalowych zabezpieczane były przed korozją przez pokrycie olejem silnikowym.



Rys.4.3. Formy bateryjne do wykonywania próbek, próbka z zabetonowanymi włóknami, uchwyt do mocowania próbki w maszynie wytrzymałościowej.



Rys.4.4. Fazy betonowania próbek do badania przyczepności pojedynczych włókien.

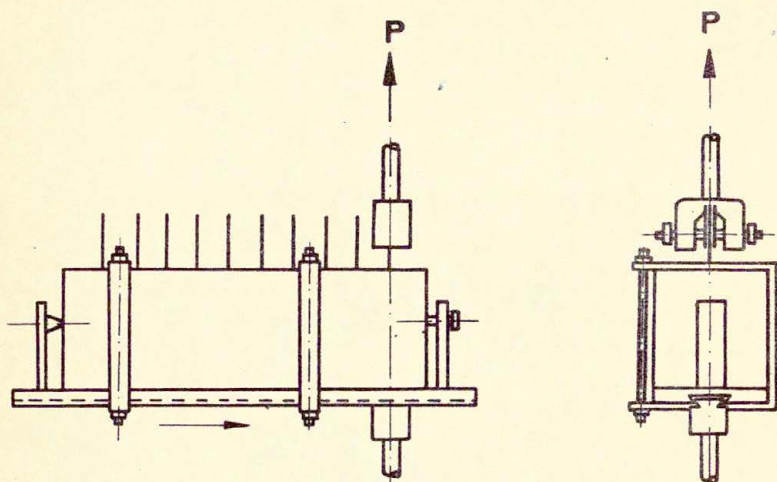


Rys. 4.5. Maszyna wytrzymałościowa Instron 1251 wraz z urządzeniami sterującymi i rejestratorem.

Badania wyciągania włókien przeprowadzono przy użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Instron 1251, na której można było narzucić stałą prędkość przemieszczeń /rys.4.5/. Próbki w szczękach maszyny zamontowane były w specjalnym uchwycie /rys.4.6./, który umożliwiał ich przesuwanie, tak aby kolejne włókna mogły znaleźć się pod szczękami maszyny. Do chwytania włókien stosowano trzy rodzaje szczęk stalowych:

- z powierzchnią ryflowaną,
- z powierzchnią gładką,
- z nakładkami z twardej gumy.

Po kilku doświadczeniach stwierdzono, że używanie szczęk ryflowanych powoduje zgniatanie włókien podczas dociskania szczęk i w efekcie pękanie włókien. W przypadku szczęk z nakładkami gumowymi następowało natomiast częste wyślizgiwanie się włókien z uchwytów. Ostatecznie zdecydowano się na



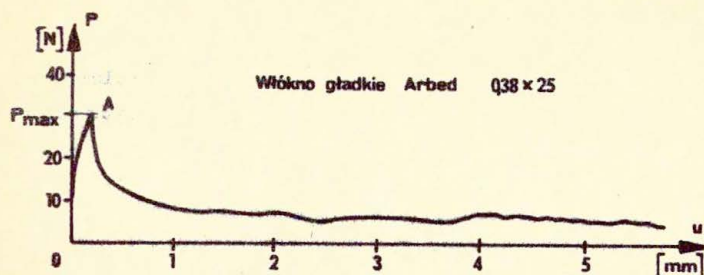
Rys.4.6. Uchwyt do mocowania próbki podczas badań przyczepnościowych.

stosowanie wyłącznie gładkich szczęk stalowych, z których włókna wyslizgiwały się tylko sporadycznie.

Maszyna wytrzymałościowa pozwalała na zmianę prędkości przemieszczeń szczęk w granicach od 0,02 mm/min do 200 mm/min. Automatyczny rejestrator wbudowany w maszynę umożliwiał zapis przebiegu badania w postaci krzywej siła-przemieszczenie, /rys.4.7./ Badania wyciągania pojedynczych włókien prowadzono ostatecznie na najmniejszym zakresie maszyny-250 N, i ze stałą prędkością wyciągania 2 mm/min.

Po odspojeniu włókna /punkt A na rys.4.7./zwiększano prędkość wyciągania do 20 mm/min i włókno wyciągano do końca.

Poznane włókna po badaniu przechowywane jako dokumentacja badań. Wyniki badań zapisywano w tabeli, której przykład podany jest poniżej.



Rys.4.7. Typowy wykres otrzymany podczas wyciągania włókna zarejestrowany przy użyciu automatycznego rejestratora wbudowanego w maszynę wytrzymałościową Instron 1251.

Tabela 4.1. Wyniki z badania próbki z serii P-1 z dn.16.05. 75 r.

1	2	3	4	5	6
LP.	Srednica włókna [mm]	Powierz. styku włókno- matryca mm ²	Maksym. siła P_{max} [N]	Przycz. nominal. σ [MPa]	UWAGI
1	0,3	18,80	39,5	2,10	
2	0,3	18,80	40,0	2,13	
3	0,3	18,80	37,6	1,99	
4	0,3	18,80	40,5	2,15	
5	0,3	18,80	38,0	2,02	
6	0,3	18,80	36,5	1,94	
7	0,3	18,80	37,5	1,99	
8	0,3	18,80	31,5	1,68	
9	0,3	18,80	12,5	0,66	włókno całe posmarowane pastą silikonową

Jako najważniejszy wynik badania przyjmowano maksymalną wartość siły wyciągającej włókno P_{max} , którą nazywano siłą wyrwyjącą włókno, kolumna 4 w Tabl.4.1. W kolumnie 5 zapisywano obliczoną nominalną wartość przyczepności tzn.:

$$/4.-1./ \quad \tau = \frac{P_{max}}{\pi \cdot d \cdot l_z}$$

W każdej grupie włókien, w której badano efekt określonego parametru, obliczano następujące wielkości statystyczne:

- wartość średnią nominalnej przyczepności

$$/4.-2./ \quad \bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} \quad [\text{MPa}]$$

tu n liczba zbadanych włókien,

- odchylenie standardowe

$$/4.-3./ \quad S(\tau) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n-1}} \quad [\text{MPa}]$$

- współczynnik zmienności

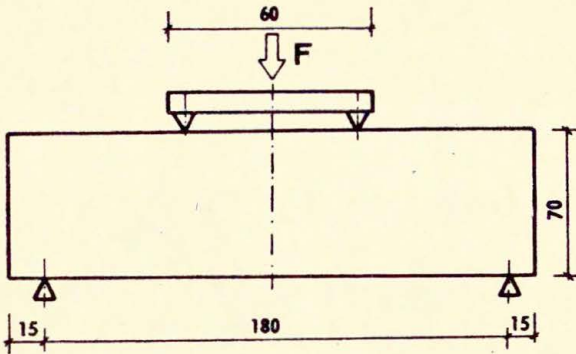
$$/4.-4./ \quad W = \frac{\sqrt{\frac{n}{n-1}} \cdot S(\tau)}{\bar{\tau}} \cdot 100 \%$$

Po wykonywaniu badań próbki, z których wyciągano włókno były łamane na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej / 25 KN/, według schematu przedstawionego na rys. 4.8. Uzyskiwano w ten sposób wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu jako dodatkową informację o matrycy. Wytrzymałość tę obliczano według wzoru:

$$/4.-6./ \quad f_{mb} = \frac{M}{W} \quad [\text{MPa}]$$

gdzie M maksymalny moment zginający w próbce, a W wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego próbki.

Badania wytrzymałości włókien na rozciąganie wykonywano również na Instronie stosując do badań takie same szczęki jak do badania wyciągania włókien z matrycy. Dokumentacja z przeprowadzonych badań, tzn. wyciągnięte włókna, wykresy wyciągania i tabele wyników przechowywane są w Pracowni Pól Odkształceń IPPT-PAN.

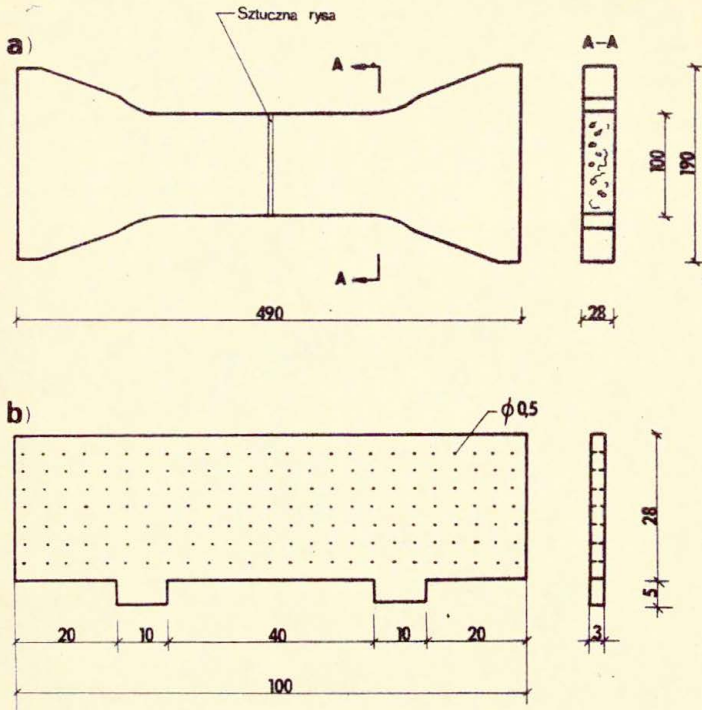


Rys.4.8. Badania wytrzymałości matrycy na rozciąganie przy zginaniu.

Opisana powyżej metoda badania przyczepności została w szczególności opracowana przez autora i sprawdzona podczas licznych doświadczeń wstępnych. Wyniki pomiarów zamieszczone i dyskutowane w rozdziale 5 zostały uzyskane przy zachowaniu niezmiennych parametrów wynikających z przygotowania próbek i ich pielęgnacji, niezmiennego sposobu zamocowywania próbek i przeprowadzania badań.

4.3. Opis przyjętej metody badania przyczepności włókien w grupach.

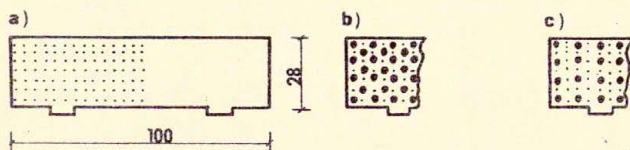
Do określania przyczepności włókien użyto zmodyfikowanych próbek o kształcie wiosełkowym, stosowanych w badaniach wytrzymałości fibrobetonu na bezpośrednie rozciąganie /rys.4.9. a./



Rys.4.9. a/ Próbkę do badania przyczepności w grupach;
b/ płytka teflonowa, imitująca rysę z otworami
do przewiekania włókien, osadzona w blasze usztywniającej.

W środku długości próbki umieszczono płytkę teflonową z włóknami stalowymi /rys. 4.9.b/, tworząc w ten sposób sztuczną rysę, przy czym dwie połówki próbki są połączone jedynie za pośrednictwem włókien. W płytce teflonowej, rys. 4.10.a, wywiercono 175 otworów, przez które przeciągnięto włókna. W zależności od średnicy i liczby umieszczonych w otworach włókien, można było modelować zmianę procentu uzbrojenia matrycy / ściślej mówiąc: uzbrojenia w strefie

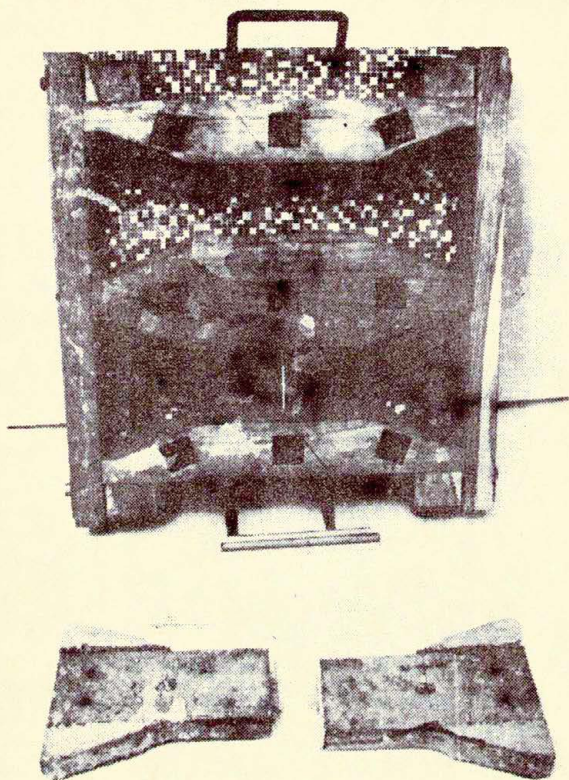
sztucznej rysy/. I tak np. w przypadku zastosowania włókien o średnicy 0,5 mm i wyzyskania wszystkich otworów stopień uzbrojenia przekroju wynosi $\beta = 1,23\%$. Jeżeli natomiast włókna



Rys.4.10. Rozmieszczenie włókien w otworach wkładki teflonowej, a/ wszystkie otwory wykorzystane, 0,5 mm $\beta = 1,23\%$, b/ wykorzystano otwory zaznaczone kropką $\varnothing 0,5$ mm $\beta = 0,57$, c/ wykorzystano te same otwory jak zaznaczono: $\varnothing 0,5$ mm, $\beta = 0,37$

mają średnicę 0,4 mm to odpowiadałoby to zawartości uzbrojenia $\beta = 0,788\%$.

Przez zmniejszenie gęstości rozstawu uzbrojenia, /rys. 4.10.b.c./ np. przez umieszczenie włókien co drugi otwór, można uzyskać różne procenty uzbrojenia w przekroju sztucznej rysy. Próbkę wykonywano w całości z fibrobetonu o proporcjach uzbrojenia takim samym jak w sztucznej rysie. W celu właściwego usytuowania wkładki teflonowej w próbce, do formy przed zabetonowaniem wkładano prostokątną blachę metalową /430 x 100 x 5 mm/ z otworami do osadzenia w niej wkładki teflonowej. Ta blacha metalowa miała również dodatkowe zadania usztywnienia całej próbki, tak aby przy wyjmowaniu próbki z formy i wprowadzaniu jej do szczęk maszyny wytrzymałościowej nie nastąpiło uszkodzenie próbki, np. złamanie jej w miejscu sztucznej rysy. Na rys.4.11 pokazana jest forma wraz z blachą metalową i wkładką teflonową przygotowana do zapełnienia oraz próbka po badaniu. Po zamocowaniu wkładki teflonowej formę zapełniono fibrobetonem i pielęgnowano, podobnie jak próbki do badań wyciągania pojedynczych włókien.

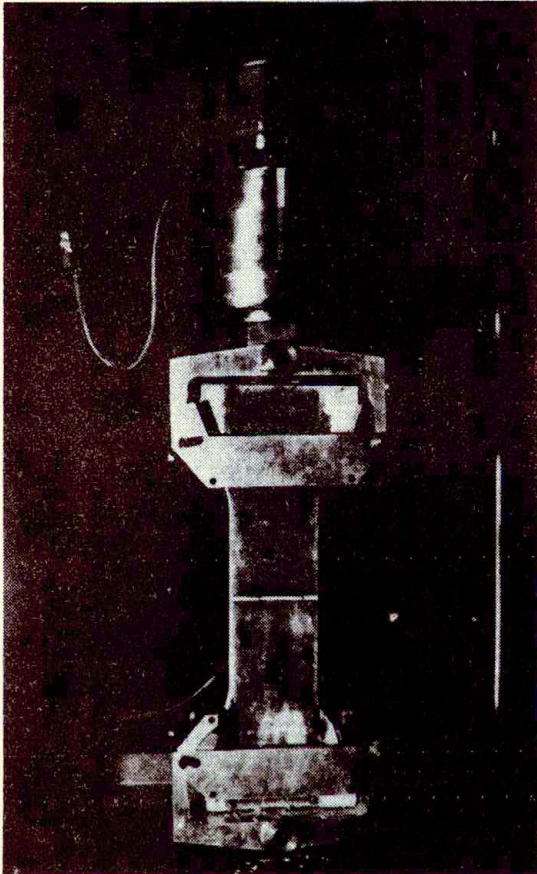


Rys.4.11. Forma do wykonywania próbek wiosełkowych; w formie widoczna blacha usztywniająca próbkę do momentu badania. Przed formą widoczne wkładki teflonowe oraz próbka po badaniu.

Przed obciążaniem, na boku próbki naklejano przy pomocy żywicy epoksydowej blachy stalowe o wymiarach 240 x 90 x 2 mm. Blachy te miały za zadanie wzmocnienie próbki tak, aby rysa nie pojawiła się poza zadanym z góry miejscem, tzn. poza przekrojem

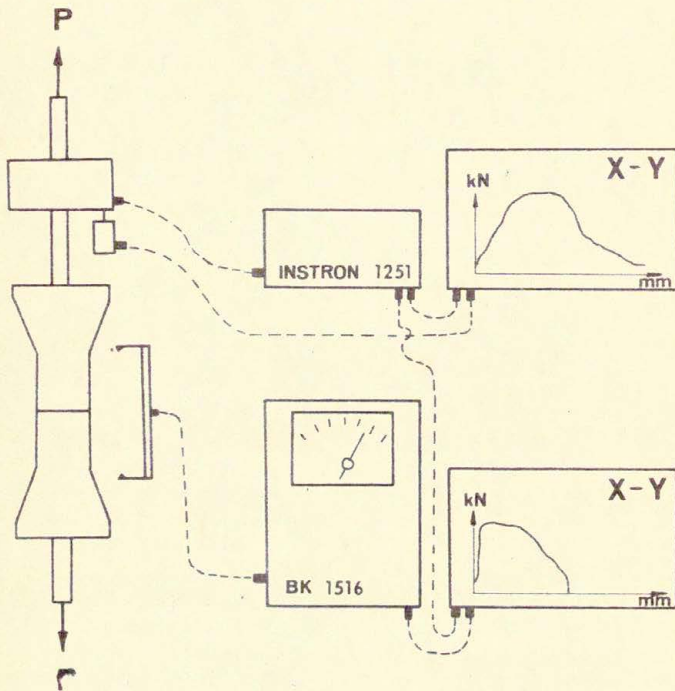
sztucznej rysy.

Badania próbek przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej Instron 1251, umieszczając próbkę w specjalnie do tego celu wykonanych szczękach /rys.4.12/, a następnie poddając rozciąganiu przy zakresie maszyny 20 kN, i prędkości przemieszczania



Rys.4.12. Próbkę włoseńkowa do badania przyczepności w grupach umieszczona w szczękach maszyny wytrzymałościowej Instron 1251.

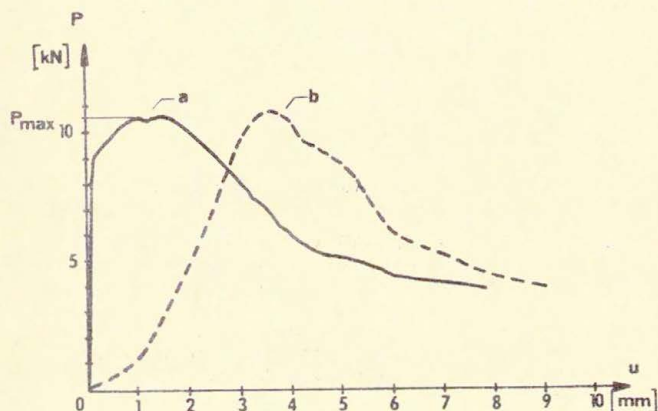
się szczęk 2 mm/min. Rejestracja przemieszczeń i siły odbywała się w sposób automatyczny na dwu rejestratorach x-y /rys. 4.13./ Na jednym rejestratorze rysowane były wykresy pochodzące od czujników wbudowanych w maszynę /przesuw tłoka/natomiasz drugi podłączony był do ekstensometru elektrooporowego, pracującego w układzie pełnego mostka. Pierwszy reje-



rys.4.13. Schemat ideowy rejestracji sił w funkcji przemieszczenia podczas badania przyczepności włókien w grupach.

strator służył jedynie do kontroli badania, jako miarodajne natomiast były przyjmowane wyniki z ekstensometru /rys.4.14/. Wyniki przemieszczeń otrzymywane z odczytów na ekstensometrze przedstawiały rzeczywiste zmiany w odległości pomiędzy dwiema połówkami próbki, natomiast na odczyty z rejestratora maszyny wytrzymałościowej składały się również odkształcenia szczęk i układu pomiarowego wbudowanego w maszynę. Jako miarę przyczepności przyjmowano wstępnie podobnie jak w badaniach przyczepności pojedynczych włókien średnią przyczepność nominalną grupową obliczaną według wzoru:

$$/4.-6/ \quad \bar{\tau}_{gr} = \frac{P_{max}}{n \cdot \pi \cdot d \cdot l_z} \quad [MPa]$$



Rys.4.14. Wykresy obciążeń w funkcji przemieszczeń, a/ wykres z ekstensometru /miarodajny/, b/ wykres uzyskany na rejestratorze maszyny wytrzymałościowej.

gdzie P_{max} maksymalna wartość siły odczytana z wykresu, rys. 4.14., n - liczba włókien w przekroju sztucznej rasy, d - średnia średnica włókna, l_z - długość zakotwienia włókna.

Tak opracowane wyniki służyły do dalszej analizy wpływu różnych czynników na wielkość przyczepności.

Obliczenie średniej przyczepności wg. wzoru /4.-6./, oparte jest na założeniu równomiernego rozkładu naprężeń stycznych wzdłuż długości włókna, a także równomiernego rozkładu naprężeń rozciągających w przekroju próbki. Słuszność tych założeń oraz próby dokładniejszej analizy rozkładu naprężeń przyczepności opisane są w rozdz. 7.

Podobnie jak w przypadku badania pojedynczych włókien, przyjęta metoda badania grup włókien i rejestracji danych została opracowana przez autora po kilku wstępnych próbach, których wyniki pominięto w ostatecznych rozważaniach.

W dostępnym piśmiennictwie zagadnienia badania grupowej przyczepności nie były opisane. Najbliższe stosunkowo były badania Hughes'a i Fattuhiego [4.7.] ale badali oni tylko nieliczne grupy włókien do 9 sztuk.

Prace cytowane w rozdziale 4.

- 4.1. R.C. de VEKEY, A.J. MAJUMDAR, Determinig bond strength in fibre reinforced composites, Magazine of Concrete Research, vol 20, nr 65, December 1968.
- 4.2. M. MAAGE, Hefteigenskapar mellom stålfibre og cementpasta betong; Institut for Bygningmateriale, Universitetet i Trondheim - Norges Tekniske Hogskole, November 1976.
- 4.3. T. OHIGASHI, Measurement of effective fracture energy of glass fibre reinforced cement, Testing and test methods of fibre cement composites, RILEM Symposium 1978, The Construction Press.
- 4.4. D.J. PINCHIN, D. TABOR, Mechanical properties of the steel cement interface some experimental results, RILEM Symposium London 1975 vol 2.
- 4.5. J. TAKAGI, Strength prediction of steel fiber reinforced concrete, Trans. of AIJ nr 251, Jan 1977.

- 4.6. M.N. DEHOUSSE, A. LEJUNE, Les mortiers et bétons renforcés de fibres métalliques, Publication ABEM Nr 401 Bulletin Cominission nr 26.
- 4.7. B.P. HUGHES, N.I.FATTUHI , Fibre bond strengths in cement and concrete, Magazine of Concrete Research Vol. 27 nr 92 Sept, 1975.
- 4.8. P. STROEVEN, Y.M. de HAAN, C. BOUTER, S.P.SHAH Pull-out tests of steel fibres, Testing and test methods of fibre cement composites, RILEM Symposium 1976, The Construction Press.

5. Badanie przyczepności pojedynczych włókien

5.1. Program badań.

W niniejszym rozdziale przedstawione są wyniki badań wyciągania pojedynczych włókien z matrycy cementowej, przeprowadzonych przez autora.

Matrycę stanowiła zaprawa cementowa o wskaźniku wodno-cementowym $w/c = 0,5$. Kruszywem stosowanym do zaprawy był piasek wiślany /max. średnica 2,0 mm/, a cement portlandzki był marki 250.

Badano następujące parametry wpływające na przyczepność włókien:

- wytrzymałość matrycy,
- objętościowy procent uzbrojenia matrycy i wiek matrycy,
- prędkość wyciągania włókien,
- kierunek wyciągania włókien względem kierunku betonowania,
- długość zakotwienia włókien,
- obróbkę chemiczną włókna,
- obróbkę mechaniczną włókien.

5.2. Wpływ wytrzymałości matrycy.

O przyczepności stali do matrycy cementowej, jak stwierdzono w rozdziale 2, decydują między innymi zakotwienia mechaniczne jakie powstają na styku włókno-matryca. Również rysy powstające przy odspojeniu włókna będą w matrycy otaczającej włókno /rozd.3/. Można więc przypuszczać, że powinna istnieć zależność między wytrzymałością matrycy, a wielkością siły wyrrywającej włókno i przyczepnością nominalną. W omawianych poniżej badaniach autor stosował zawsze ten sam skład matrycy, z której wykonano próbki, ponieważ jednak mieszanie przeprowadzono ręcznie, a cement jakim dysponowano pochodził z różnych cementowni, wytrzymałości poszczególnych

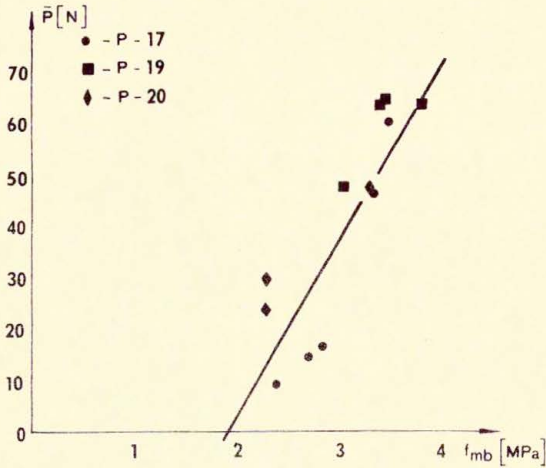
próbek różniły się od siebie dość znacznie. Pozwoliło to na poszukiwanie korelacji między wytrzymałością matrycy a siłą wyrwywającą i przyczepnością nominalną. Jako miarę wytrzymałości przyjmowano wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu beleczek, z których wyciągano włókna /rozd. 4.2./.

Aby zbadać zależność siły od wytrzymałości matrycy f_{m_b} skorzystano z wyników badań serii P-17, P-19 i P-20 /patrz Załącznik 1/ w których to seriach były badane włókna produkcji IPPT 0,5 x 2,0 mm. W tabeli 5.1 zestawione są wyniki badań. Otrzymane wartości sił wyrwywających i przyczepności nominalnych naniesiono na wykresy i wykonano interpolację liniową przy użyciu metody najmniejszych kwadratów /rys.5.1 i rys. 5.2./ Równanie opisujące zależność siły od wytrzymałości matrycy jest następujące:

$$/5.-1./ \quad \bar{P}_i = 35,036 f_{m_b} - 65,780 .$$

Tabela 5.1. Wpływ wytrzymałości matrycy na przyczepność nominalną włókna, 0,5 x 40 mm IPPT.

Nr próbki	f_{m_b} [MPa]	\bar{P} [N]	\bar{c} [MPa]	n [sztuk]
P-17/1	2,403	9,310	0,302	6
P-17/2	2,712	14,578	0,472	6
P-17/3	2,852	16,739	0,544	9
P-19/2	3,394	63,457	2,067	5
P-19/3	3,101	47,739	1,555	9
P-19/4	3,439	65,300	2,127	8
P-19/5	3,350	46,603	1,518	8
P-19/6	3,604	60,479	1,789	7
P-19/7	3,790	64,439	2,099	5
P-20/5	3,315	48,600	1,583	10
P-20/6	2,294	24,280	0,791	7
P-20/7	2,317	30,427	0,991	6

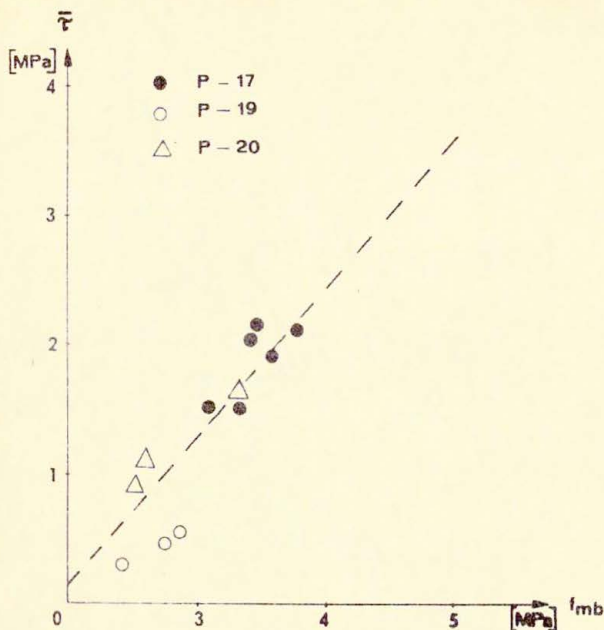


Rys.5.1. Zależność siły wrywającej włókno od wytrzymałości matrycy na rozciąganie f_{mb} przy zginaniu,

Natomiast wpływ wytrzymałości na przyczepność nominalną jest opisany następującym równaniem:

$$/5.-2./ \quad \bar{\tau} = 1,108 f_{mb} - 2,057$$

Powyższe równanie pozwalają na skorygowanie wyników badań przyczepnościowych, jeżeli badane włókna wyciągane były z beleczek o różnej wytrzymałości. Uperacja ta pozwala na bardziej dokładną i miarodajną analizę wyników doświadczalnych, gdyż pozwala ująć wpływ na wyniki badania dodatkowego parametru jakim jest wytrzymałość matrycy.



Rys.5.2. Zależność przyczepności nominalnej $\bar{\tau}$ od wytrzymałości matrycy na rozciąganie przy zginaniu f_{mb} .

Jeżeli przyjmiemy jako poziom porównawczy wyniki z badań beleczek o wytrzymałości na zginanie f_{mbs} , a kolejne beleczki będą miały wytrzymałości f_{mbi} , oraz odpowiednio przyczepności włókien τ_i , wówczas sprowadzona przyczepność τ_{sp} będzie obliczona wg. wzoru:

$$/5.-3./ \quad \tau_{sp} = 1,108 (f_{mbi} - f_{mbs}) + \tau_i .$$

Analogicznie można obliczyć wartość sprowadzonej siły wyrwującej włókno:

/5.-4./

$$\bar{P}_{sp} = 35,036 (f_{mb1} - f_{mb2}) + \bar{P}_c$$

Powyższe badania wykazały, że można przyjmować postulowaną prostą zależność między siłą wyrywającą i przyczepnością nominalną a wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu matrycy. Pozwala to na korygowanie błędów wynikających z różnych wytrzymałości próbek i uzyskiwanie bardziej jednoznacznych wyników. Możliwe jest również oszacowanie przyczepności danego włókna do matrycy na podstawie wytrzymałości matrycy.

5.3. Wpływ procentu uzbrojenia matrycy.

Jakość matrycy tzn. zaczynu cementowego, zaprawy lub mikrobetonu jest jednym z istotnych czynników decydujących o przyczepności uzbrojenia. Jak wynika z badań przedstawionych w rozdziałach 5.1., oraz 2.1, 2.2, wytrzymałość matrycy wpływa bezpośrednio na wzrost przyczepności nominalnej.

Najważniejszą cechą fibrobetonu jest uzbrojenie matrycy równomiernie rozproszonymi włóknami, które redukują skurcz i powstrzymują rozprzestrzenianie się ewentualnych rys [5.1],[5.2]. Wpływa ono w decydujący sposób na rozmaite cechy kompozytu. Zamiast więc badać kolejno wpływ poszczególnych właściwości matrycy, jak np. jej pełzania, szczelności, skurczu itp. na wartość przyczepności, postanowiono jako badany zmienny parametr przyjąć procent uzbrojenia włóknami β .

Badania przeprowadzono według metody opisanej poprzednio w rozdz. 4.2. .

Pojedyncze włókna wyciągano z matrycy uzbrojonej włóknami równomiernie rozproszonymi. Zakres badań w poszczególnych seriach próbek podany jest w Załączniku 1. Analizę wyników przeprowadzono kolejno w dwu etapach. Najpierw zestawiono wyniki uzyskane przy nominalnej zawartości uzbrojenia matrycy wynoszącej $\beta = 0,1$ i 2%. Następnie, rezultaty badań przy mniejszych procentach uzbrojenia $\beta = 0,36, 0,60$ i 1% prze-

analizowano uwzględniając rzeczywiste uzbrojenie matrycy, różne naogół od uzbrojenia nominalnego.

W tabelicy 5.2. zestawione są wyniki dotyczące nominalnych procentów uzbrojenia. Widać z niej, że prawdopodobnie ze względu na pewne nieuwzględnione parametry badania /np. zmiana jakości cementu/, wartość przyczepności nominalnej dla 0% uzbrojenia w serii P-17 i P-18 różni się dość znacznie,

Tab.5.2. Wpływ procentu uzbrojenia matrycy na przyczepność nominalną włókna 0,5 x 40 mm IPPT.

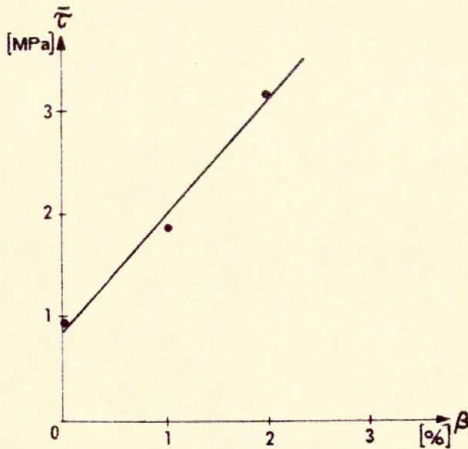
Procent uzbr. matrycy β [%]	$\bar{\tau}$ [MPa]		δl_{β}
	Seria P-17	Seria P-18	
0	0,430	0,962	1,000
1	-	1,884	1,958
2	1,392	-	3,237

gdzie: $\delta l_{\beta} = \frac{\bar{\tau}_{\beta}}{\bar{\tau}_{0\%}}$

a więc bezpośrednie ilościowe porównywanie wyników obu serii jest niemożliwe. Dlatego też dla $\beta = 2\%$ wartość przyczepności nominalnej odnoszącą się do serii P-18 obliczono korzystając z proporcji:

$$/5.-5./ \quad \bar{\tau}_{2\%}^{P-18} = \frac{\bar{\tau}_{2\%}^{P-17} \cdot \bar{\tau}_{0\%}^{P-18}}{\bar{\tau}_{0\%}^{P-17}}$$

Postuluje się zatem, że gdyby w serii P-18 wykonano również próbkę o $\beta = 2\%$ to przyczepność nominalna badanych włókien byłaby $\bar{\tau} = 3,136$ MPa. Korzystając z tabeli 5.2 i obliczonej przyczepności dla $\beta = 2\%$ dla serii P-18 wykonano wykres zależności przyczepności od procentu uzbrojenia matrycy β /rys.5.3./. Okazało się że zależność przyczepności nominalnej $\bar{\tau}$ od procentu uzbrojenia β jest prawie liniowa w zakresie badanych procentów uzbrojenia.

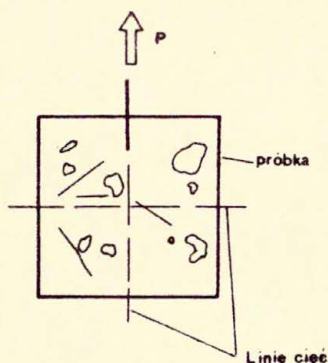


Rys.5.3. Wpływ procentu β uzbrojenia matrycy na przyczepność, serie P-17 i P-18.

Wynik ten potwierdza przypuszczenie, że uzbrojenie matrycy jest ważnym parametrem przy ilościowym określeniu przyczepności nominalnej, bowiem np. dodanie 2% włókien może zwiększyć przyczepność nominalną trzykrotnie. W związku z tym badania wyciągania włókien powinny być prowadzone na próbkach o odpowiednim uzbrojeniu.

Wykres na rys. 5.3. dotyczy nominalnych zawartości uzbrojenia. Tymczasem na podstawie zdjęć rentgenowskich i szlifów próbek fibrobetonowych [5.3.], [5.4.] wiadomo, że dystrybucja włókien w matrycy jest bardzo nierównomierna. Należy się zatem spodziewać, że rzeczywisty procent uzbrojenia w okolicach wyciąganego włókna jest zmienny, różny od nominalnego. Aby sprawdzić wpływ rzeczywistej zmienności parametru β na przyczepność, próbki 5,6,7,8 z serii P-22 po przeprowadzonych badaniach pocięto wzdłuż osi włókien i w połowie wysokości

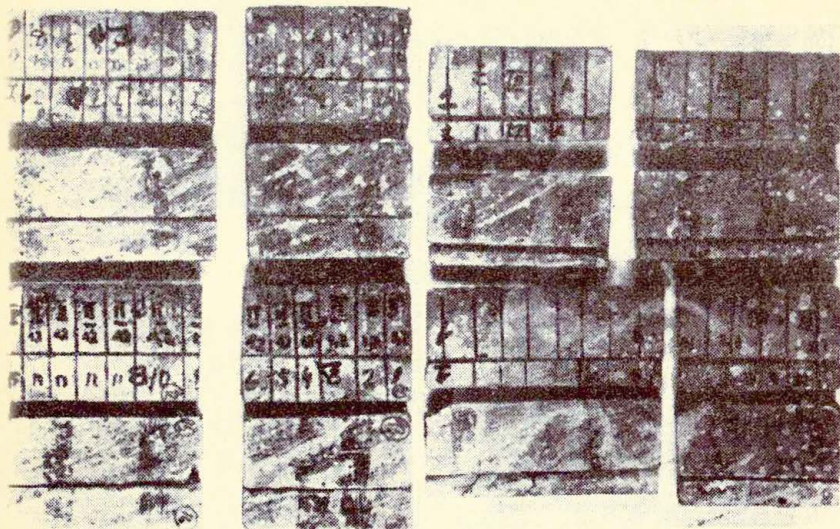
próbki prostopadłe do osi wyciąganych włókien /rys.5.4. i rys. 5.5/.



Rys.5.4. Schemat pocięcia próbki fibrobetonowej, po przeprowadzonych badaniach przyczepności, w celu obliczenia ilości włókien w przekroju i wykonania zdjęć rentgenowskich.

W ten sposób uzyskano cienkie płytki fibrobetonowe, które były w bezpośrednim otoczeniu wyciąganych włókien prześwietlane promieniami rentgena, a uzyskane rentgenogramy pokazane są na rys. 5.6., 5.7., 5.8, 5.9. Równocześnie na szlifach policzono widoczne ślady włókien.

Na podstawie zdjęć rentgenowskich lub liczby włókien widocznych na szlifie, obliczano ze wzorów stereologicznych opracowanych przez Kasperkiewicza [5.5] , [5,6], rzeczywisty procent uzbrojenia. Wzory te nie są tu wyprowadzone a oparte są na zliczaniu bądź liczby włókien widocznych w przekroju bądź liczby przecięć włókien widocznych na rentgenogramie z dowolnym odcinkiem prostej.



Rys.5.5. Zdjęcia pociętych próbek przygotowanych do liczenia liczby włókien i zrobienia zdjęć rentgenowskich.

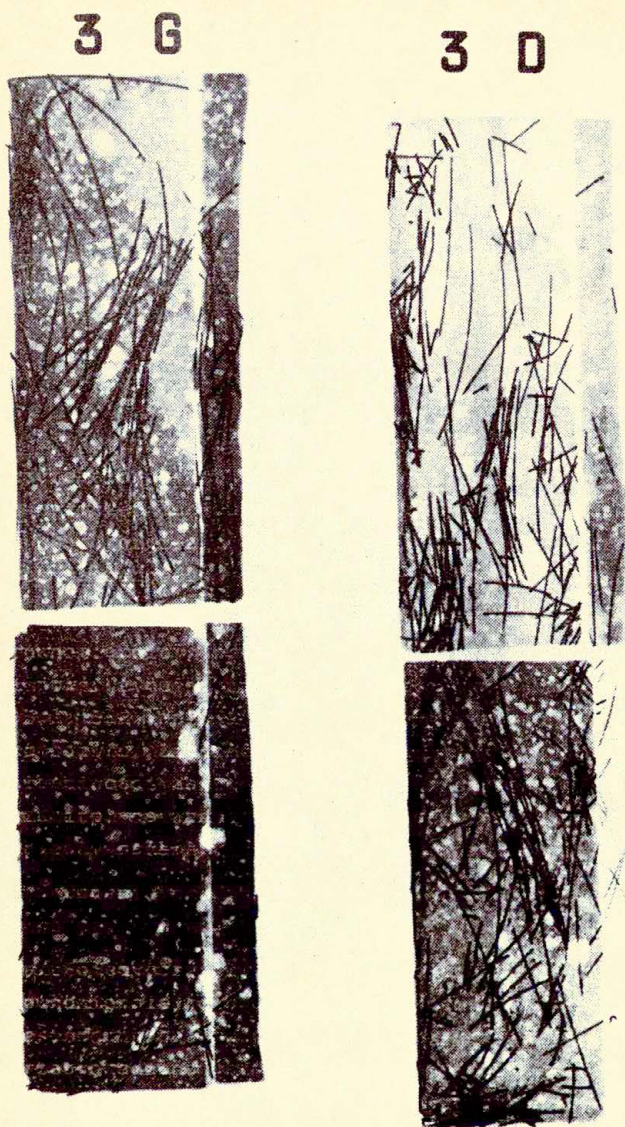
Przy obliczaniu β ze zdjęć rentgenowskich korzystano z następującego wzoru:

/5.-6./
$$\beta = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{2 \cdot a \cdot b} \cdot 100\% ,$$

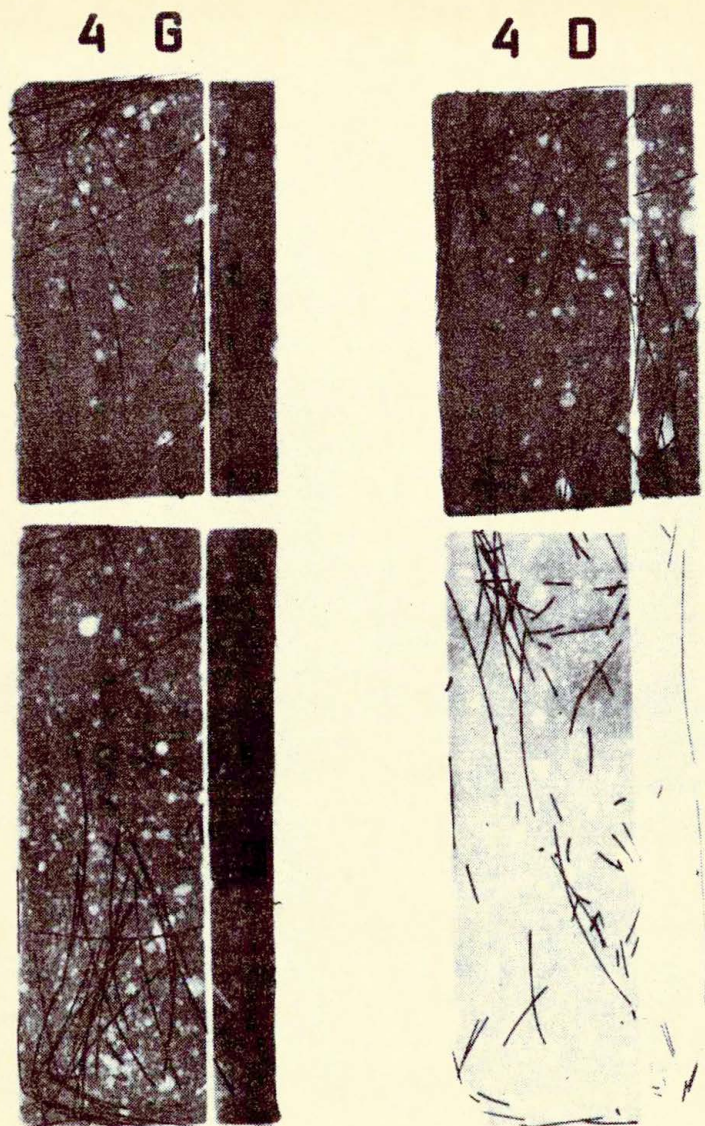
a przy obliczaniu z ilości włókien w przekroju ze wzoru:

/5.-7./
$$\beta = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{2 \cdot l \cdot g} \cdot 100\% ,$$

gdzie: d - średnica włókna, a i b - wymiary przekroju, w którym zliczano włókna, g - grubość prześwietlanego elementu, l - długość odcinka wzdłuż którego zliczano liczbę przecięć z cieniami włókien n - liczba włókien w obserwowanym przekroju

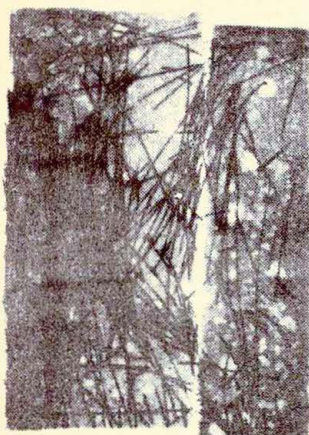


rys.5.6. Zdjęcie rentgenowskie próbki 5 z serii P-22 nominalny procent uzbrojenia $\beta = 0,6\%$;
3 G - prześwietlenie górnej połówki próbki,
3 D - prześwietlenie dolnej połówki próbki.

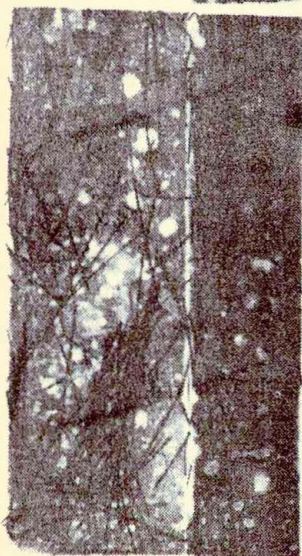
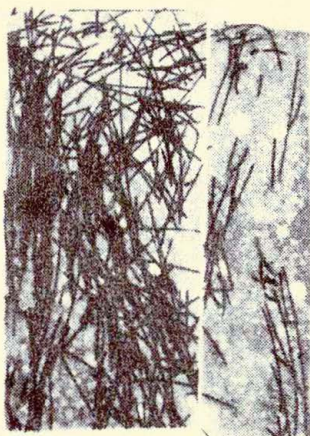


Rys.5.7. Zdjęcie rentgenowskie próbki 6 z serii P-22 nominalny procent uzbrojenia $\beta = 0,6\%$;
4 - G - prześwietlenie górnej połówki próbki,
4 - D - prześwietlenie dolnej połówki próbki.

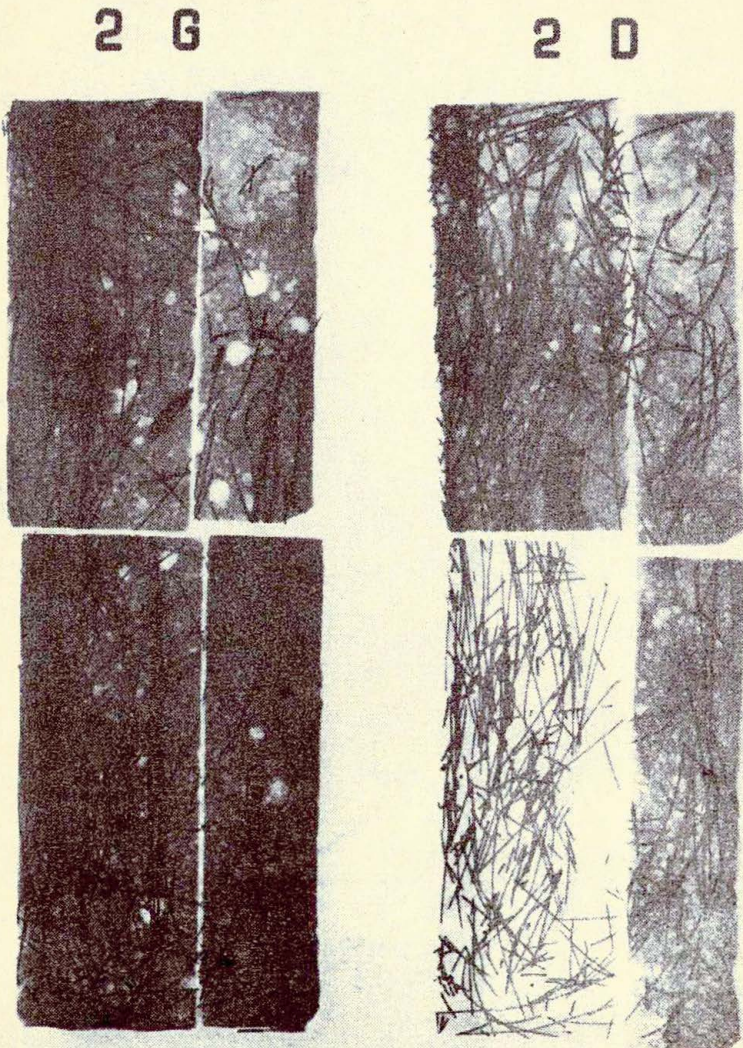
1 G



1 D



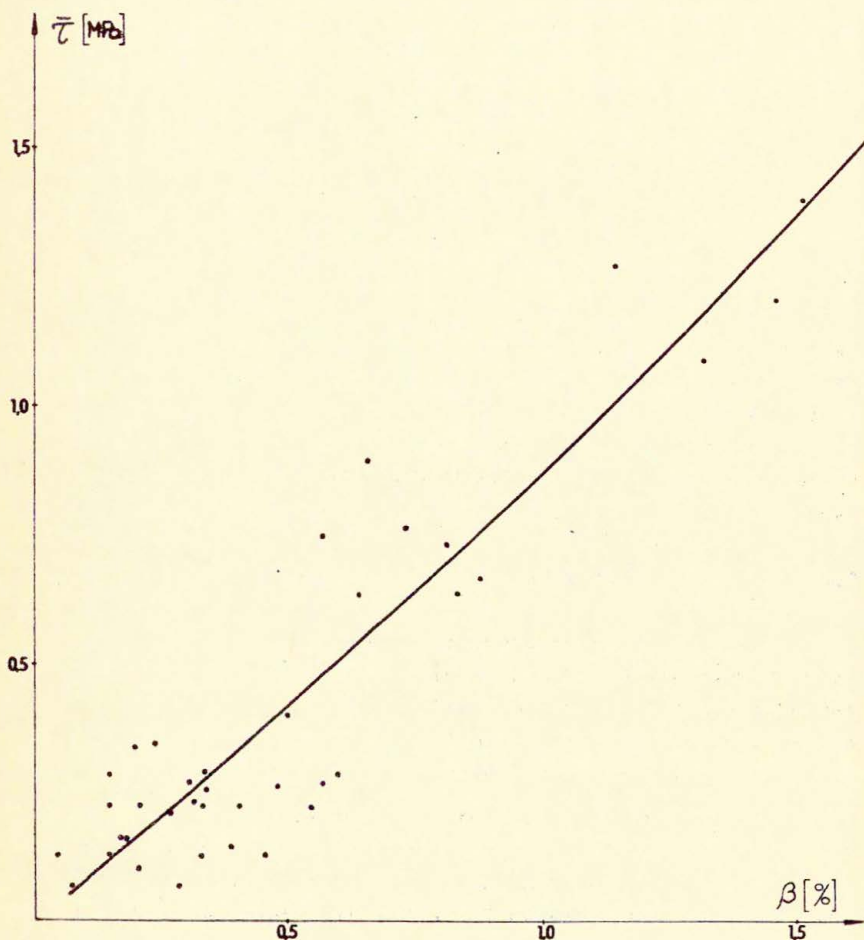
Rys.5.8. Zdjęcie rentgenowskie próbki 7 z serii P-22 nominalny procent uzbrojenia $\beta = 1,2\%$;
1 G - prześwietlenie górnej połówki próbki,
1 D - prześwietlenie dolnej połówki próbki.



Rys.5.9. Zdjęcie rentgenowskie próbki 8 z serii P-22 nominalny procent uzbrojenia $\beta = 1,2\%$;
2 G - prześwietlenie górnej połówki próbki,
2 D - prześwietlenie dolnej połówki próbki.

lub liczba przecięć odcinka z włóknami widocznymi na zdjęciu.

Wyniki pomiarów naniesiono na wykres w postaci punktów i zinterpolowano je parabolą drugiego stopnia przy użyciu metody najmniejszych kwadratów.



Rys.5.10. Zależność przyczepności od rzeczywistego procentu uzbrojenia matrycy.

Z rysunku 5.10 widać, że zależność przyczepności nominalnej od procentu uzbrojenia jest bliska liniowej. Należy jednak zwrócić uwagę na znaczny rozrzut punktów przy $\beta < 0,5\%$. Widać, że nie ma w tym obszarze wyraźnej zależności przyczepności nominalnej od procentu uzbrojenia matrycy. Na podstawie przeprowadzonych badań można zatem stwierdzić, że powyżej wartości $\beta \approx 0,5\%$ wraz ze wzrostem procentu uzbrojenia matrycy wprost proporcjonalnie przyrasta przyczepność nominalna. Można ten wynik uzasadnić okolicznością, że wprowadzenie włókien powoduje hamowanie skurczu, co korzystnie wpływa na przyczepność, jak również przy odspajaniu wyciąganego włókna powstająca wokół niego rysa zatrzymywana jest przez włókna sąsiednie, co w efekcie powoduje podniesienie przyczepności nominalnej. Innym wytłumaczeniem wzrostu przyczepności nominalnej wraz z przyrostem procentu uzbrojenia matrycy może być to, że wprowadzenie włókien powoduje obniżenie stosunku wodno-cementowego w/c matrycy, co również może podnosić wartość przyczepności nominalnej. Żadna z powyższych przypuszczeń nie została przez autora potwierdzona, są to jedynie hipotezy, których wyjaśnienie wymaga oddzielnych badań.

5.4. Wpływ wieku matrycy.

Betony cementowe, zaprawy i zaczyny są materiałami, w których wytrzymałość rośnie w miarę upływu czasu a także zachodzą różne procesy reologiczne. Należy się zatem spodziewać, że może istnieć bezpośredni związek między wiekiem matrycy a przyczepnością nominalną w fibrobetonie.

Aby stwierdzić czy istnieje taki związek, przeprowadzono doświadczenia badając przyczepność pojedynczych włókien do zaprawy cementowej po różnych okresach czasu od wykonania próbek. Badania przeprowadzono przyjmując jako porównywalne wyniki tych doświadczeń, które były wykonane przy użyciu próbek z tego samego zarobu.

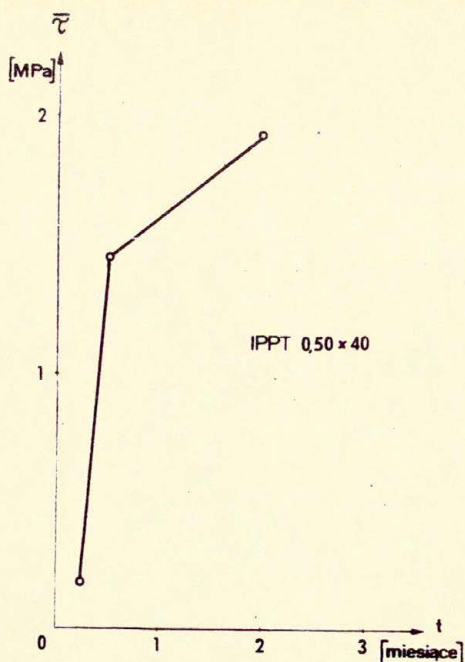
W serii P-23 badano przyczepność włókien stalowych wytwarzanych w IPPT /0,5 x 40/. Badania przyczepności wykonano po 7 dniach /0,25 miesiąca/ po 13 dniach /ok. 0,5 miesiąca/ i po 56 dniach / ok 2 miesiące/. Wyniki badań podane są w tab. 5.3. i na rys. 5.11.

Tabela 5.3. Wpływ wieku matrycy na przyczepność nominalną włókna IPPT /0,5 x 40 mm/

Wiek matrycy [dni]	$\bar{\sigma}$ [MPa]	$s(\bar{\sigma})$ [MPa]	w (%)	n [szt]
7	0,199	0,131	65,8	13
13	1,447	0,159	12,7	5
56	1,929	0,150	8,1	12

Okazuje się, że w okresie pierwszych dwu tygodni następuje bardzo szybki przyrost przyczepności, którego tempo potem maleje. Z tabeli 5.3, widać również, że dla badanego włókna po 7 dniach od chwili wykonania próbek współczynnik zmienności przyczepności jest bardzo duży bo aż 68,5% ale po 13 dniach wynosi on 12,7% a po 2 miesiącach tylko 8,1%. Na podstawie tych obserwacji można stwierdzić, że już po upływie dwóch tygodni procesy zachodzące w zaczynie w otoczeniu włókien stabilizują się i dalszy przyrost przyczepności jest powolny.

W celu zbadania jak następuje zmiana przyczepności w okresie dłuższym niż 2 miesiące wykonano serię próbek P-25. Badania przyczepności wykonano po 14 dniach /ok.0,5 miesiąca/, po 28 dniach /ok.1 miesiąca/, po 154 dniach / ok.5 miesięcy/ po 311 dniach /ok. 10,5 miesiąca/ oraz po 434 dniach / ok. 14,5 miesięcy/. W wykonanej serii próbek badano trzy rodzaje włókien. Włókno wytwarzane w IPPT /0,5 x 30 mm/, włókna Arbed / 0,38 x 25 mm/ oraz włókna haczykowane firmy Bekaert /0,4 x 30 mm/. Przyczepność badano zawsze przy zakotwieniu



Rys.5.11. Wpływ wieku matrycy na przyczepność nominalną włókna IPPT 0,5 x 40 mm, seria P-23.

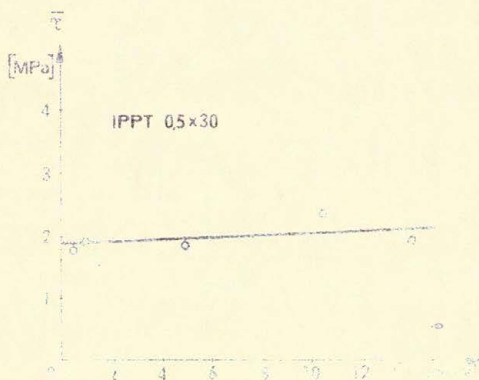
włókna na połowie długości. Dla włókien haczykowatych ze względu na ich odmienny charakter dokonywano pomiaru siły P i obliczenia przyczepności w trzech charakterystycznych punktach wykresu /patrz rozdz. 3.8./: przy przemieszczeniu na wykresie równym 0,2 mm, przy wartości maksymalnej siły oraz przy przemieszczeniu 5 mm. Wartość maksymalnej siły występowała dla kolejnych włókien przy wartościach przemieszczeń od 0,6 do 2,0 mm. Po przeanalizowaniu wyników badań postanowiono interpolować je za pomocą prostej.

W tabeli 5.4 i na rys. 5.12 przedstawiono wyniki badań zmian przyczepności w czasie, dla włókien /0,5 x 30/ wytwarzanych w IPPT.

Tab.5.4. Wpływ wieku matrycy na przyczepność włókna
0,5 x 30 mm IPPT, P-25.

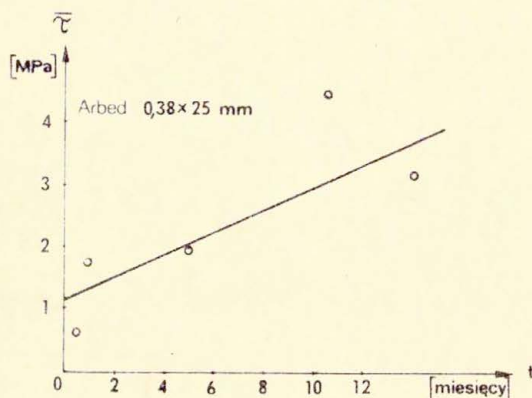
Wiek ma- trycy [miesiące]	$\bar{\tau}$ [MPa]	$\delta(\bar{\tau})$ [MPa]	W($\bar{\tau}$) [%]	Liczba włókien [szt]
0,5	1,785	0,183	19,4	9
1,0	1,913	0,170	9,4	10
5,0	1,848	0,139	8,1	7
10,5	2,314	0,431	20,8	5
14,0	1,911	0,215	15,0	4

Widać, że dla tego typu włókna, które jest wykonane z mię-
kkiej stali o wytrzymałości na zerwanie 440 MPa, przyczep-
ność do zaprawy cementowej w ciągu roku nie zmienia się /rys.
5.12./



Rys.5.12. Wpływ czasu na przyczepność włókien produkcji IPPT
/0,5 x 30/ do matrycy cementowej, seria P-25.

W tabeli 5.5. przedstawiono wyniki badań zmiany w czasie przyczepności dla włókien produkcji firmy Arbed /0,38 x 25 mm/. Włókno to jest wytwarzane z twardej stali, której wytrzymałość na zrywanie wynosi 965 MPa, a więc jest ponad dwukrotnie większa od wytrzymałości włókna produkcji IPPT. Dla tego włókna po upływie roku widoczny jest wzrost przyczepności i to dość znaczny, bo prawie dwukrotny /rys. 5.13./



Rys.5.13. Wpływ czasu na przyczepność włókien produkcji Arbed /38 x 25/ do matrycy cementowej, seria P-25.

Tabela 5.5. Wpływ wieku matrycy na przyczepność, włókna 0,3 x 25 mm Arbed, P-25.

Wiek matrycy [miesiące]	$\bar{\tau}$ [MPa]	$S(\bar{\tau})$ [MPa]	$W(\bar{\tau})$ [%]	Liczba włókien [szt]
0,5	0,616	0,160	27,5	9
1,0	1,753	0,869	53,5	7
5,0	1,943	0,688	37,6	9
10,5	4,219	0,655	17,4	5
14,0	2,876	0,430	17,4	4

Jak widać z powyższej tabeli, w pierwszym okresie /do 0,5 roku/ rozrzuty podczas badań były bardzo duże. Spowodowane było to okolicznością, że włókna tego typu są sztywne i podczas montażu próbek i zaciskania szczęk może następować odspojenie włókien zanim jeszcze rozpocznie się właściwe badanie. W tabelach 5,6, 5,7, 5,8, 5,9, zestawiono wyniki badań przyczepności włókien haczykowatych produkcji firmy Bekaert /0,4 x 30 mm/.

Tabela 5.6. Wpływ wieku matrycy na przyczepność włókien haczykowatych 0,4x30 mm Bekaert, przy przemieszczeniu 0,2 mm

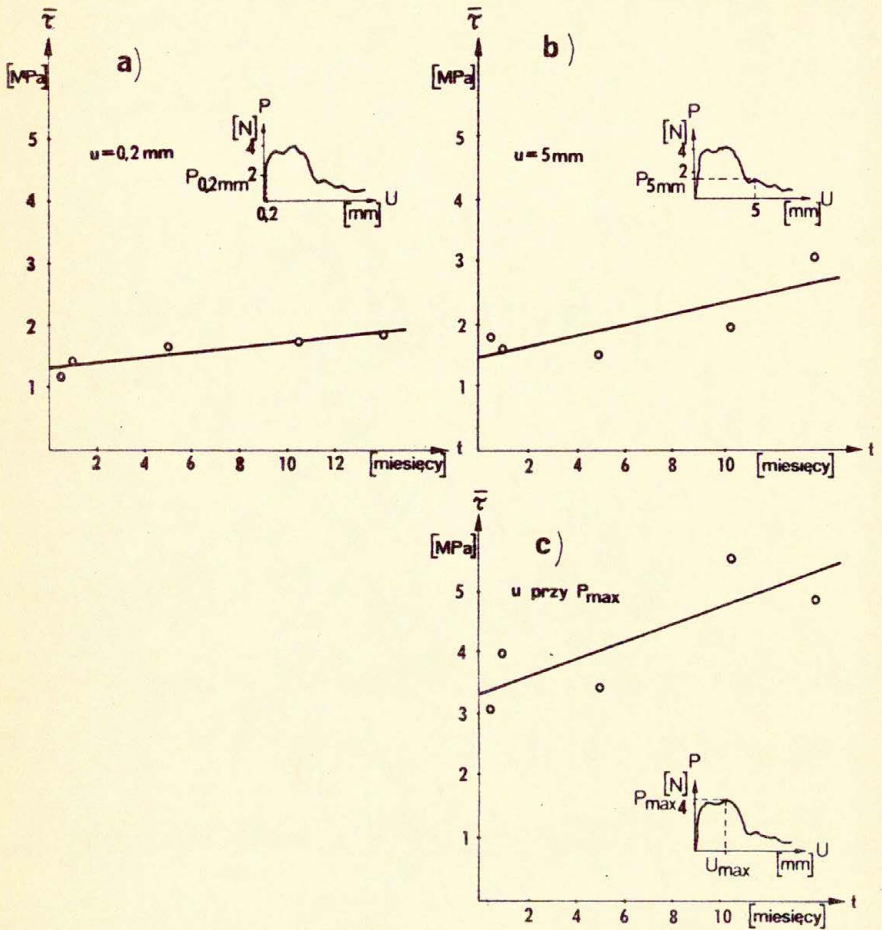
Wiek matrycy [miesiące]	$\bar{\tau}$ [MPa]	$S(\bar{\tau})$ [MPa]	$W(\bar{\tau})$ [%]	Liczba włókien [szt]
0,5	1,198	0,248	22,0	9
1,0	1,431	0,215	15,9	10
5,0	1,622	0,683	44,4	10
10,5	1,723	0,406	26,3	5
14,0	1,841	0,546	56,0	5

Tabela 5.7. Wpływ wieku matrycy na przyczepność włókna haczykowego 0,4 x 30 mm Bekaert, przy przemieszczeniu 5,0 mm

Wiek matrycy [miesiące]	$\bar{\epsilon}$ [MPa]	$S(\bar{\epsilon})$ [MPa]	$W(\bar{\epsilon})$ [%]	Liczba włókien [szt]
0,5	1,789	0,434	25,7	9
1,0	1,585	0,659	44,1	10
5,0	1,507	0,777	54,3	10
10,5	1,941	0,713	41,1	5
14,0	3,082	0,786	29,4	5

Tabela 5.8. Wpływ wieku matrycy na przyczepność włókna haczykowego 0,4 x 30 mm - Bekaert, przy wartości maksymalnej siły wyrwywającej.

Wiek matrycy [miesiące]	$\bar{\epsilon}$ [MPa]	$S(\bar{\epsilon})$ [MPa]	$W(\bar{\epsilon})$ [%]	[szt]
0,5	3,090	0,736	25,3	9
1,0	4,007	0,522	13,8	10
5,0	3,437	0,855	26,2	10
10,5	5,488	0,676	13,8	5
14,0	5,027	1,287	28,6	5



Rys.5.14. Wpływ czasu na przyczepność włókien produkcji Bekaert / 0,4 x 30 /, do matrycy cementowej seria P-25.

Dla ustalonego przemieszczenia szczęk maszyny wytrzymałościowej 0,2 mm stwierdzono najmniejszy przyrost naprężeń przyczepnościowych /rys.5,14/. Największy natomiast przyrost naprężeń przyczepnościowych stwierdzono biorąc pod uwagę maksymalną wartość siły wyrrywającej włókno, tzn. dotyczy to przyczepności nominalnej.

Na podstawie powyższych badań nad wpływem wieku matrycy na przyczepność można stwierdzić, że w okresie pierwszego miesiąca od chwili wykonania fibrobetonu przyczepność wszystkich rodzajów włókien szybko wzrasta. W dalszym okresie przyrost przyczepności jest o wiele wolniejszy. W zależności od kształtu i materiału włókna jest on zróżnicowany. np. dla włókna produkcji Arbed jest on większy /rys.5.13./, a dla włókna wytwarzanego w IPPT praktycznie przyczepność nie zmienia się już po upływie ok. 2 miesięcy /rys.5.12/.

Wydaje się, że zaobserwowane różnice narastania przyczepności włókien "miękkich" /IPPT/ i "twardych" /Arbed/ wynikają z odmiennej stali, użytej do ich wykonania. Na takie zjawiska zwrócili również uwagę Harris, Varlow i Ellis [5.7]. Można przypuszczać, że korozja stali i "wżeranie" się zaczynu cementowego w powierzchnię włókien zachodzi szybciej w przypadku włókien miękkich i jest zakończone po ok. 2 miesiącach. Natomiast we włóknach twardych proces ten jest powolniejszy i stąd wynika przyrost przyczepności stwierdzony w długim okresie czasu.

We wszystkich przeprowadzonych badaniach zauważono, że w rozpatrywanym okresie 14 miesięcy badane włókna nigdy nie miały przyczepności mniejszej niż po upływie jednego miesiąca od chwili wykonania próbek, a więc można przyjmować jako miarodajną przyczepność nominalną włókien tę, którą mają właśnie po upływie 28 dni od chwili wykonania próbek. Spos trzeżenie to miałyby znaczenie przy ewentualnej normalizacji metod badania przyczepności włókien w fibrobetonie.

5.5. Wpływ prędkości wyciągania włókna z matrycy na przyczepność.

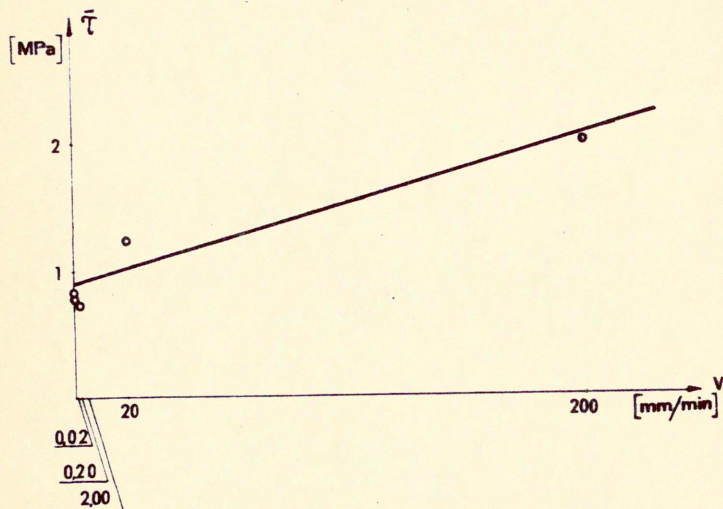
Maszyna wytrzymałościowa Instron typ 1251, na której prowadzone były badania daje szerokie możliwości doboru prędkości przemieszczania szczęk od 0,01 mm/min do 200 mm/min. Równocześnie istnieje możliwość zmiany prędkości przesuwu papieru od 1 do 1000 mm/min. Pozwala to zachować tę samą skalę na wykresach wykonywanych podczas automatycznej rejestracji przebiegu badania. W celu zbadania zależności między przyczepnością a prędkością wyciągania wykonano badania, w których stosowano różne prędkości przemieszczenia szczęk maszyny /seria P-24/.

Do badań użyto dwa typy włókien: włókno firmy Arbed 0,38 x 25 mm i włókna haczykowate firmy Bekaert 0,4 x 30 mm. Dla włókien haczykowatych obliczenie wartości przyczepności dokonywano w trzech charakterystycznych punktach: przy przemieszczeniach 0,2 mm, 5 mm i przy przemieszczeniu odpowiadającemu maksymalnej sile wyrywającej. Włókna wyciągano z następującymi prędkościami 0,02; 0,20; 2,00; 20,00; 200,00 mm/min. Podczas badania włókien gładkich firmy Arbed / tab.5.9 / stwierdzono, że przy prędkościach od 0,02 do 2,0 mm/min nie ma wyraźnych różnic w wartościach przyczepności. Dopiero zwiększenie prędkości wyciągania w zakresie 20 ÷ 200 mm/min. powoduje znaczny wzrost przyczepności.

Tabela 5.9. Wpływ prędkości wyciągania na przyczepność nominalną, włókna Arbed / 0,38 x 25 mm/.

Prędkość ruchu szczęk [mm/min.]	σ_c [MPa]	$\sigma(\bar{\epsilon})$ [MPa]	Liczba włókien
0,02	0,811	0,608	3
0,20	0,780	0,450	4
2,00	0,729	0,196	4
20,00	1,205	0,571	3
200,00	1,968	0,609	4

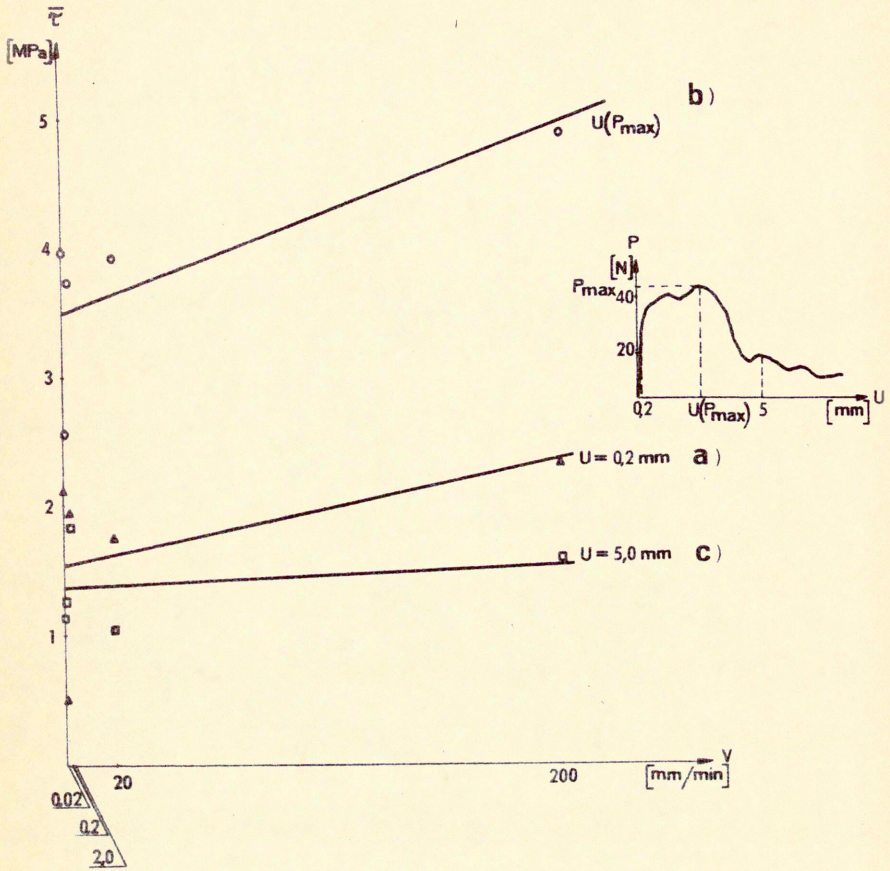
Wyniki doświadczeń przedstawiono za pomocą prostej, korzystając z metody najmniejszych kwadratów, rys.5.15.



Rys.5.15. Wpływ prędkości wyciągania na przyczepność nominalną włókien 0,38 x 25 mm firmy Arbed.

Badając włókna haczykowane firmy Bekaert/tab.5.10. i rys. 5.16/ stwierdzono, że dla przemieszczeń $U = 0,2$ mm i U/P_{\max} przyczepności nominalne zależą jak gdyby skokowo od prędkości. Przy prędkości 0,02 mm/min. są najmniejsze; przy prędkości 0,20; 2,00 i 20,00 mm/min są zbliżone do siebie, a największe są przy prędkości 200 mm/min.

Przy przemieszczeniu $U = 5$ mm, zwiększaniu prędkości wyciągania nie towarzyszą wyraźne zmiany wartości przyczepności nominalnych. Związane jest to z tym, że przy takim przemieszczeniu włókno jest już całkowicie odspojone i wyprostowane, działają zatem między włóknem a matrycą jedynie siły tarcia, które nie są zależne od prędkości przykładania siły.



Rys. 5.16. Wpływ prędkości wyciągania na przyręczność nominalną włókien haczykowatych 0,4 x 30 mm firmy Bekaert,
a/ przy przemieszczeniu $U = 0,2$ mm,
b/ przy przemieszczeniu $U(P_{max})$,
c/ przy przemieszczeniu $U = 5$ mm.

Tabela 5.10. Wpływ prędkości wyciągania na przyczepność nominalną włókna Bekaert 70,4 x 30 mm/.

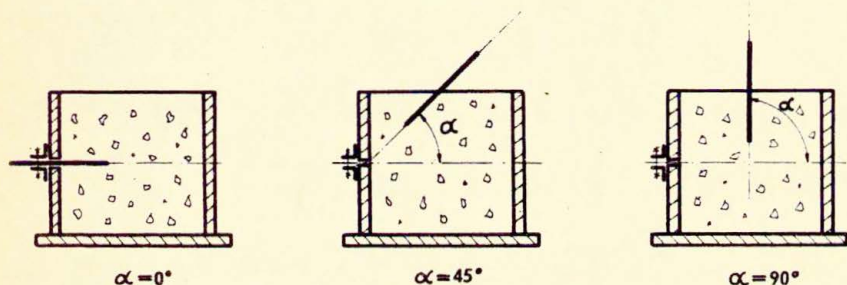
Prędkość ruchu szczęk [mm/min]	$u = 0,2$		$u(P_{min})$		$u = 54$		Liczba włókien n [szt]
	$\bar{\sigma}$ [MPa]	$S(\bar{\sigma})$ [MPa]	$\bar{\sigma}$ [MPa]	$S(\bar{\sigma})$ [MPa]	$\bar{\sigma}$ [MPa]	$S(\bar{\sigma})$ [MPa]	
0,02	0,526	-	2,573	-	1,480	-	1
0,20	2,118	0,693	3,979	0,728	1,124	0,236	5
2,00	1,937	0,855	3,741	0,803	1,885	0,750	4
20,00	1,775	0,740	3,916	0,327	1,016	0,329	6
200,00	2,345	0,495	4,878	0,504	1,610	0,621	5

Porównując wyniki badania włókna gładkiego z wynikami badania włókna haczykowego można stwierdzić, że zależności są dla obu typów włókien podobne.

Na podstawie przeprowadzonych badań i przedstawionych wyników można stwierdzić, że aby obserwowana przyczepność nominalna nie zależała od prędkości obciążania, należy wyciągać włókna z prędkością nie większą niż 2 mm/min. Przy większych prędkościach, ponad 20 mm/min, odspajanie włókna ma charakter dynamiczny i wtedy należy uwzględniać wpływ prędkości na siłę wyrywającą a co z tym idzie na przyczepność. Niezależna od prędkości wyciągania jest wielkość przyczepności mierzona już po odspojeniu a wynikająca tylko z działania sił tarcia. W badaniach, które są przedmiotem niniejszej pracy autor stosował prędkość 2 mm/min, przy wyciąganiu pojedynczych włókien jak również przy badaniu przyczepności w grupach włókien.

5.6. Wpływ kierunku wyciągania włókien względem kierunku betonowania.

Włókna w fibrobetonie rozmieszczone są najczęściej w sposób przypadkowy, ich kąt nachylenia do poziomu zmienia się od 0° do 90° . Przebieg zjawisk przyczepności może być zależny od kierunku wyciągania włókna w stosunku do kierunku betonowania. Badania przyczepności, które omawiane są w niniejszej pracy były tak przeprowadzane, że włókna były zawsze zabetonowane w pozycji horyzontalnej. Aby sprawdzić czy zorientowanie włókien ma wpływ na przyczepność przeprowadzono trzy serie badań oznaczone P-19, P-20 i P-24, w których zbadano wpływ kąta nachylenia α włókna do poziomu na wielkość przyczepności. Paski papierowe, na których umieszczono włókna przed zabetonowaniem, wkładano do form pod kątem $\alpha = 0^{\circ}$, $\alpha = 45^{\circ}$ i $\alpha = 90^{\circ}$.



Rys.5.17. Sposób umieszczenia włókien do badań wpływu pozycji włókna podczas betonowania na przyczepność.

Podczas badania próbka była tak umieszczona w szczękach maszyny wytrzymałościowej aby oś włókna pokrywała się z kierunkiem siły wyrywającej włókno. Zbadano trzy typy włókien, włókno wytwarzane w IPPT / $0,5 \times 40$ mm/, włókno produkcji firmy Arbed / $0,38 \times 25$ mm/, oraz włókna haczykowe produkcji

firmy Bekaert / 0,4 x 30 mm/. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.11.

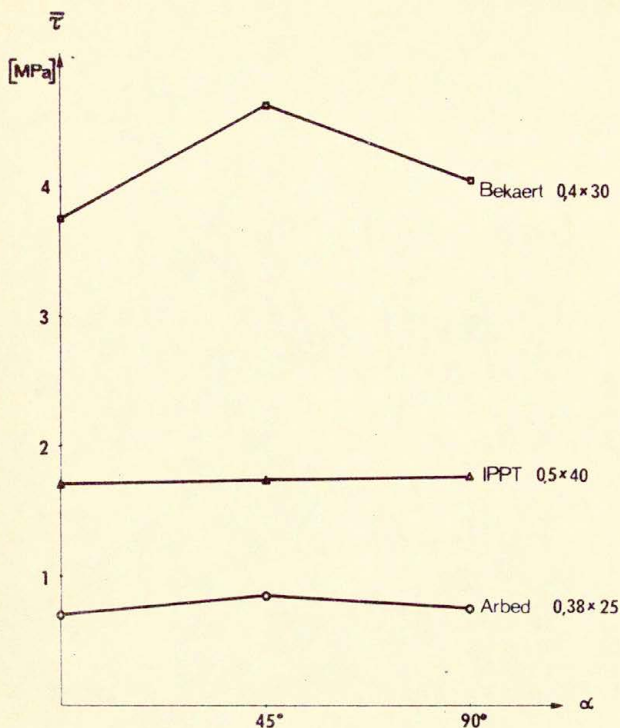
Tabela 5.11. Wpływ pozycji włókna podczas betonowania na przyczepność nominalną.

Typ włókien wymiary [mm]	Kąt nachylenia do poziomu α					
	0°		45°		90°	
	\bar{c} [MPa]	n	\bar{c} [MPa]	n	\bar{c} [MPa]	n
IPPT 0,5 x 40	1,712	21	1,751	25	1,784	24
Arbed 0,38x25	0,680	5	0,845	6	0,735	7
Bekaert 0,3x30	3,741	7	4,647	8	4,074	8

Na podstawie badań sporządzono wykresy zależności przyczepności od kąta nachylenia / rys.5.18/. Z wykresów tych widać że tylko w przypadku włókna haczykowego firmy Bekaert można zauważyć niewielki wpływ zorientowania włókna podczas betonowania i wiązania, natomiast przyczepność pozostałych włókien była zawsze niezależna od tego czy włókno było położone pod kątem $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ czy też $\alpha = 90^\circ$. Można zatem stwierdzić, że przyczepność włókien w fibrobetonie jest niezależna od ich zorientowania w stosunku do kierunku betonowania i położenia podczas wiązania matrycy. Wniosek ten dotyczy włókien prostych, a wymaga dalszego zbadania w odniesieniu do włókien z haczykami.

5.7. Wpływ długości zakotwienia l_z na przyczepność.

Jednym z podstawowych elementów decydujących o wielkości siły wyrwającej włókno jest jego długość zakotwienia l_z . W rzeczywistym fibrobetonie, w którym zabetonowane są włókna o długości $2 \cdot l_z$ z chwilą pojawienia się rys włókna mają różne długości rzeczywiste zakotwienia, ponieważ rys nie biegnie jedynie przez środki długości włókien a przecina je w miejscach przypadkowych. Aby zbadać jaki wpływ ma długość

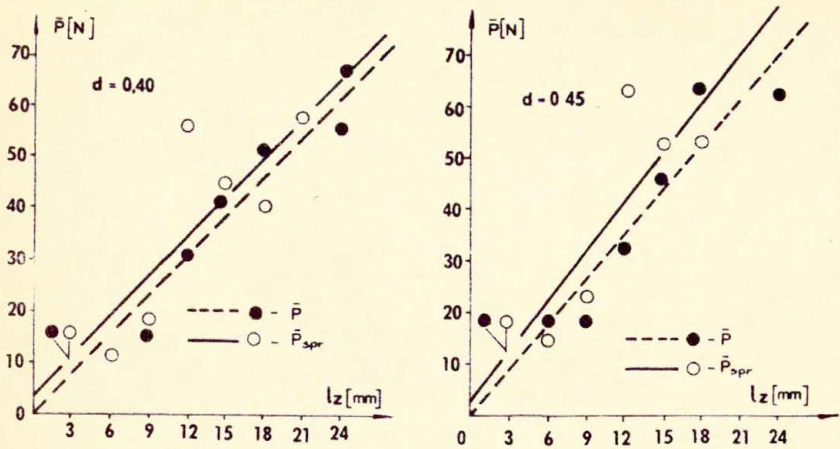


Rys.5.18. Wpływ pozycji włókna podczas betoniwania na nominalną przyczepność włókien produkcji IPPT, Arbed i haczykowatych produkcji Bekaert.

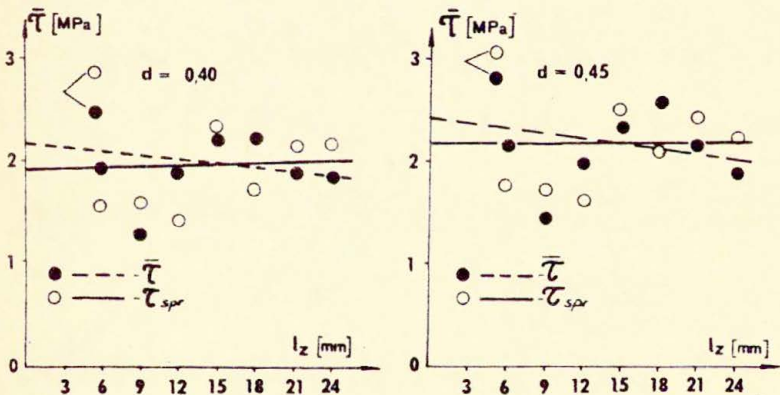
zakotwienia na siłę wrywającą i przyczepność wykonano serię próbek /P-26/, w której zbadano przyczepność 120 włókien zmieniając skokowo ich długość od 3 do 24 mm co 3 mm. Badania były prowadzone na włóknach produkcji IPPT o średnicach nominalnych 0,4 i 0,45 mm. Wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w tabeli 5.12.

Tabela 5.12. Wpływ długości zakotwienia włókna na przyczepność.

l_z [mm]	f_m [MPa]	\bar{d} [mm]	\bar{P} [N]	\bar{T} [MPa]	$S(T)$ [MPa]	$W(T)$ [°K]	\bar{P}_{sp} [N]	\bar{T}_{sp} [MPa]	N [szt]
3	1,96	0,403	10,312	2,715	1,093	45,0	10,312	2,715	5
		0,444	12,571	3,003	0,791	30,4	12,571	3,003	4
6	2,29	0,402	14,843	1,957	0,435	24,9	11,907	1,571	5
		0,447	18,125	2,163	0,887	44,5	14,957	1,787	5
9	1,70	0,405	15,066	1,315	0,309	25,1	18,645	1,628	8
		0,450	18,643	1,465	0,100	7,6	22,307	1,753	7
12	2,35	0,400	31,600	1,920	0,315	17,7	56,104	1,488	7
		0,450	33,600	2,008	0,251	13,5	62,513	1,658	7
15	1,84	0,409	42,962	2,233	0,425	20,7	45,607	2,366	9
		0,443	46,893	2,378	0,337	15,8	52,427	2,511	6
18	2,37	0,404	51,013	2,231	0,451	23,5	40,603	1,777	4
		0,446	64,778	2,586	0,182	10,0	53,778	2,132	6
21	1,69	0,405	50,995	1,907	0,327	18,2	58,951	2,206	9
		0,444	63,715	2,175	0,319	16,4	72,478	2,474	6
24	1,64	0,403	56,550	1,862	0,300	17,4	63,372	2,217	10
		0,441	63,550	1,911	0,407	23,8	75,356	2,266	5



Rys.5.19. Zależność siły wrywającej włókno od długości zakotwienia: a/ włókna o średnicy 0,4 mm b/ włókna o średnicy 0,45 mm, linia przerywana-interpolacja dla wartości uzyskanych w doświadczeniu, linia ciągła-interpolacja dla wartości sprowadzonych.



Rys.5.20. Zależność przyczepności od długości zakotwienia a/ włókna o średnicy 0,4 mm b/ włókna o średnicy 0,45 mm, linia przerywana-interpolacja dla wartości uzyskanych w doświadczeniu, linia ciągła-interpolacja dla wartości sprowadzonych.

Uwzględniając różnice w wytrzymałości matrycy skorygowano, korzystając z zależności wyprowadzonych w rozdziale 5.2., wartości sił i przyczepności, otrzymując tzw. wartości sprowadzone P_{sp} i τ_{sp} . Są one również zestawione w tabeli 5.12. Po naniesieniu wyników badań na wykresy dokonano interpolacji liniowej /Rys.5.19 i rys. 5.20/.

Na wykresy naniesiono zarówno wartości otrzymane z badań bezpośrednio jak i wartości sprowadzone.

Na podstawie powyższych wykresów można stwierdzić, że dla długości zakotwień l_z w granicach od 0 do 60 d wartość przyczepności nominalnej nie zależy od długości zakotwienia. Oznacza to, że w zazwyczaj używanych w fibrobetonie włóknach, których współczynnik kształtu $l/d = 100$, można na przykład przyjmować stały rozkład naprężeń przyczepnościowych wzdłuż włókna.

5.8. Wpływ obróbki chemicznej włókien.

Zastosowanie trawienia chemicznego włókien, jak stwierdzono przy obserwacjach mikroskopowych, prowadzi do wytworzenia na powierzchni włókna mikronierówności. Aby sprawdzić czy następuje również polepszenie przyczepności włókien do matrycy przeprowadzono serię badań, w których włókna stalowe poddano obróbce zanurzając je w 2% roztworze wodnym HCl, przez który w celu przyspieszenia trawienia przepuszczano prąd o napięciu 4,5 V /seria P-1/.

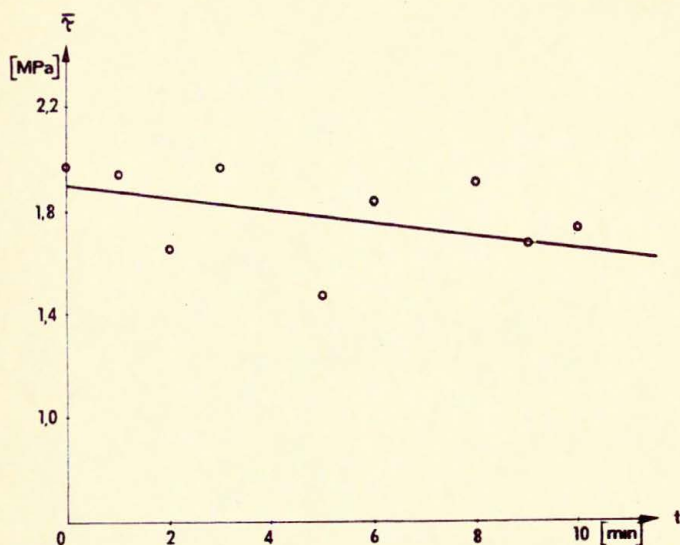
Przygotowano 8 grup włókien, które różniły się czasem trwania zanurzenia ich w elektrolicie od 1 do 10 minut. Tak przygotowane włókna zabetonowano w formach do badania przyczepności pojedynczych włókien opisanym już w/rozd.4.2./ Równocześnie przeprowadzono badanie wytrzymałości na zerwanie włókien użytych w badaniach oraz obserwacje mikroskopowe powierzchni włókien.

Tabela 5.13. Wpływ trawienia 2% roztworem HCl na przyczepność.

Czas zanurzenia w 2% rozt. HCl [min.]	$\bar{\tau}$ [MPa]	$s(\bar{\tau})$ [MPa]	Liczba włókien [szt]	f_t [MPa]
0	1,98	0,50	4	618,51
1	1,95	0,4	8	619,12
2	1,65	0,52	7	606,17
3	1,97	0,10	9	594,21
5	1,47	0,61	8	587,83
6	1,84	0,36	8	570,18
8	1,91	0,30	7	545,11
9	1,67	0,57	8	525,30
10	1,75	0,45	9	517,5

W tabeli 5.13 podane są wyniki badań, na podstawie których dokonano interpolacji metodą najmniejszych kwadratów /rys. 5.21/.

Widać stąd, że wraz z wydłużeniem czasu zanurzenia włókien w elektrolicie nie następuje polepszenie przyczepności a wręcz odwrotnie wyraźne pogorszenie. Natomiast stwierdzono przy obserwacji mikroskopowej, że powierzchnia włókien poddanych obróbce chemicznej jest w wyniku trwania bardziej chropowata. Te mikro nierówności nie mogą jednak wpływać na poprawę przyczepności, gdyż rysa powstająca wokół włókna podczas odapajania tworzy się w matrycy, dalej od powierzchni włókna niż sięgają nierówności wywołane wytrawieniem /rozd.3/ Mayfield i Zelly [5.7], którzy prowadzili badania wytrzymałości beleczek fibrobetonowych, z włóknami stalowymi poddanych trawieniu w kwasie solnym, stwierdzili spadek wytrzymałości w beleczkach zawierających włókna wytrawiane. Badania autora przedstawione w tabeli 5.13 pozwalają na uzasadnienie wyników uzyskanych w pracy [5.7] obniżoną przyczepnością włókien trawionych do matrycy.



Rys. 5.21. Zależność przyczepności od czasu zanurzenia badanego włókna w 2% roztworze HCl.

Drugą metodą obróbki chemicznej /seria P-7/, którą zbadano było oczyszczanie włókien toluenem z tłuszczu i zanieczyszczeń, którymi mogą one zostać pokryte w trakcie ich wytwarzania. Dwie grupy włókien odtłuszczonych i nieodtłuszczonych poddano badaniu. W wyniku badania stwierdzono, że średnia przyczepność dla włókien nieodtłuszczonych wynosiła 1,29.Mpa a dla włókien odtłuszczonych 1,23 MPa. Różnica wynosi około 5% i mieści się w granicach błędów doświadczenia. Można więc stwierdzić, że włókna które przygotowano do badania przez zabieg odtłuszczania praktycznie nie zmieniają swej przyczepności. Prawdopodobnie nie były natłuszczone w czasie produkcji. Warto tu odnotować wyniki badań Paillère i Serano [5.8.], podczas których stwierdzono, że natłuszczone włókna a więc rozmyślnie pozbawione przyczepności nie wpływały zupełnie na właściwości wytrzymałościowe fibrobetonu.

5.9.. Wpływ obróbki mechanicznej włókien.

Przeprowadzone badania miały na celu stwierdzenie jak poprzez mechaniczne zdeformowanie włókien poprawia się ich przyczepność i zmienia sposób utraty spójności na styku włókno-metryca. Aby przeanalizować te zjawiska wykonano szereg badań, w których użyto czterech typów włókien: włókna gładkie, włókna nagniatane rzadko, włókna nagniatane gęsto, i włókna haczykowane /rys. 5.22, 5.23./ serie P-4, P-10, P-11, P-13, P-21/.

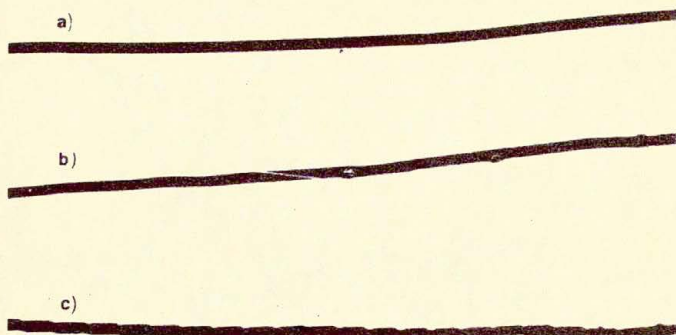
W tabeli 5.14. podano wyniki badania wyciągania włókien gładkich i nagniatanych wytwarzanych w IPPT, o średnicy 0,4 mm i długościach zakotwień $l_z = 5,15,20,130$ mm.

Uzyskano w wyniku badań wartości współczynnika poprawy przyczepności δ_l , który osiąga zbliżone wartości w badanych grupach włókien.

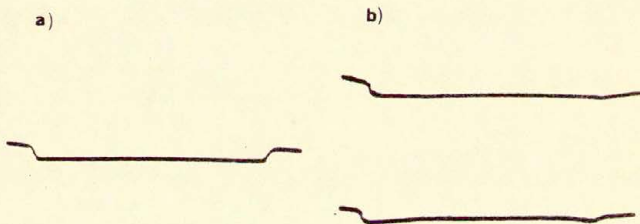
Tabela 5.14. Wpływ nagniatania włókien na przyczepność.

Typ włókna i wymiary $d \times l_z$ [mm]		$\bar{\sigma}$ [MPa]	$s(\bar{\sigma})$ [MPa]	$W(\bar{\sigma})$ [%]	Liczba włókien badanych [szt]	δ_l
0,4x5	gładk.	0,637	0,286	44,6	9	1,443
	nagn. gęsto	0,919	0,145	16,5	15	
0,4x15	gładk.	1,464	0,308	22,4	17	1,527
	nagn. gęsto	2,235	0,705	37,0	12	
0,4x20	gładk.	1,756	0,257	14,5	23	1,388
	nagn. gęsto	2,437	0,373	15,5	32	
0,4x30	gładk.	0,616	0,338	55,5	80	1,494
	nagn. rzadko	0,920	0,284	31,1	74	

Wytrzymałość włókien: gładkich - 439,73 MPa
nagniatanych gęsto - 400,80 MPa



Rys.5.22. Typy włókien wytwarzanych w IPPT-PAN /0,4 x 40 mm/ i badanych przez autora, a/ włókna gładkie, b/ włókna nagniatane rzadko, c/ włókna nagniatane gęsto.



Rys.5.23 Włókno haczykowane /0,4 x 30 mm/ produkcji Bekaer[®] a/ przed badaniem, b/ po wyciągnięciu z próbki /zabetonowany był prawy koniec włókna/.

Z porównania wartości w ostatniej kolumnie tabeli 5.14. widać, że niezależnie od długości zakotwienia współczynnik poprawy przyczepności $\delta\ell$ waha się od 1,388 do 1,527, co oznacza około 50% wzrost przyczepności. Wzrost ten uzyskano mimo osłabienia włókien przez nagniatanie, średnio z $f_t = 439,73$ MPa do $f_t = 400,80$ MPa. Okazało się poza tym, że o ile nagniatanie włókien powiększa wyraźnie ich przyczepność, to rozstaw karbów nie ma znaczenia.

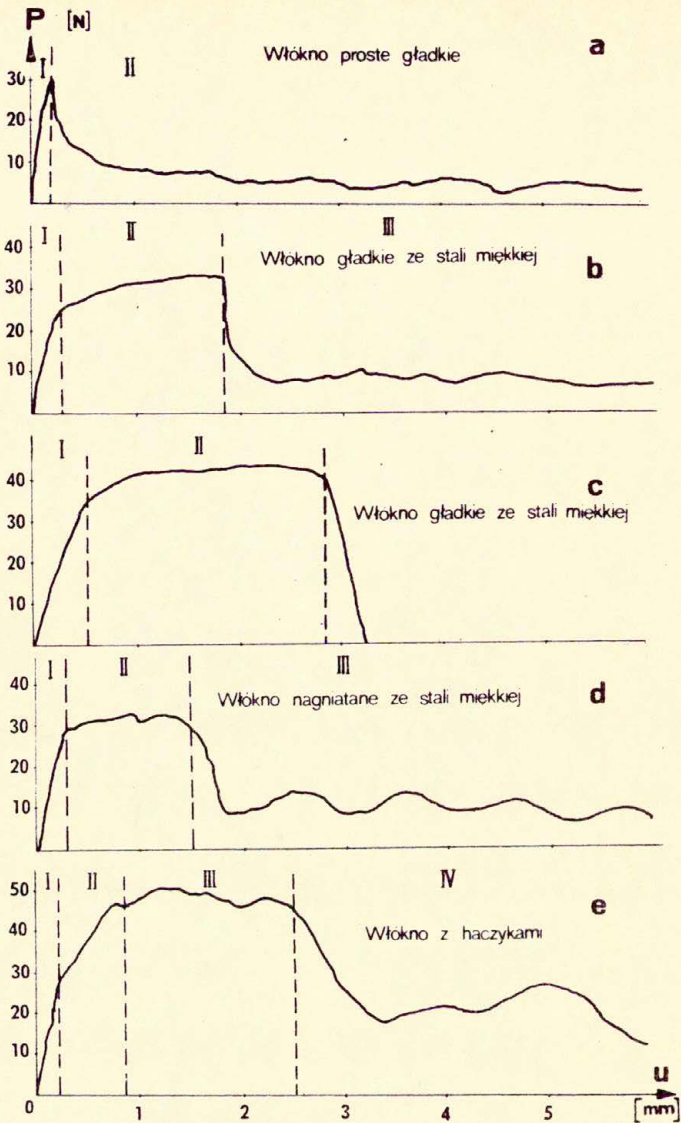
W dalszych doświadczeniach zbadano włókna firmy Arbed /0,3 x 25 mm/ i / 0,38 x 25 mm/ oraz firmy Bekaert /0,4 x 30 mm/, a wyniki badań są zestawione w tabeli 5.15.

Tabela 5.15. Wpływ deformacji włókna na jego przyczepność.

Typ włókna i wymiary [mm]	$\bar{\sigma}$ [MPa]	$s(\bar{\sigma})$ [MPa]	$w(\bar{\sigma})$ [%]	n [szt]	f_t [MPa]
Arbed gładkie 0,30x25	3,169	1,197	43,0	30	964,80
Arbed gładkie 0,38x25	2,829	1,398	44,9	28	956,97
Bekaert haczyk. 0,40x30	3,423	0,683	20,4	25	1421,74

Z tabeli 5.15. widać, że najlepszą przyczepność mają włókna haczykowate. Natomiast wpływ różnej średnicy włókien na przyczepność wydaje się przypadkowy.

Wykresy typu a/ pokazane na rys. 5.24. uzyskano podczas wyciągania gładkich włókien, których długość zakotwienia l_z jest mniejsza od długości krytycznej włókna l_{cr} tzn. $l_z < l_{cr}$ / l_{cr} oznacza taką długość zakotwienia włókna, przy której wyciągane włókno z matrycy musi ulec zerwaniu tzn. $l_{cr} = \frac{f_t \cdot d}{4 \cdot \bar{\sigma}}$ /. Wykres ten można podzielić na dwie części. Pierwsza do momentu gdy włókno traci swoją przyczepność, /punkt A/, odpowiada sprężystemu odkształceniu swobodnego odcinka włókna pomiędzy szczękami a próbką. Druga część



Rys.5.24. Typowe wykresy uzyskiwane podczas wyciągania włókna z matrycy cementowej

wykresu, po osiągnięciu maksymalnej siły, odpowiada przenoszeniu obciążenia z włókna na matrycę jedynie dzięki siłom tarcia między tymi dwiema fazami.

Wykresy typu b/ pokazanego na rys. 5.24 obserwowano podczas badania włókien, których długość zakotwienia l_z była bliska l_{cr} , a wytrzymałość włókien wynosiła poniżej 500 MPa /włókna wytwarzane w IPPT z miękkiej stali/. Ten typ wykresu można podzielić na trzy charakterystyczne części. Pierwsza /I/ to sprężyste odkształcenie włókna do chwili osiągnięcia przez nie granicy plastyczności $f_{0.2}$. Druga część wykresu /II/ odpowiada odspajaniu się włókna podczas jego uplastycznienia i jest ograniczona wartością siły, która powoduje całkowite odspojenie się włókna. Trzecia część wykresu odpowiada jedynie tarcia jakie występuje pomiędzy włóknom a matrycą.

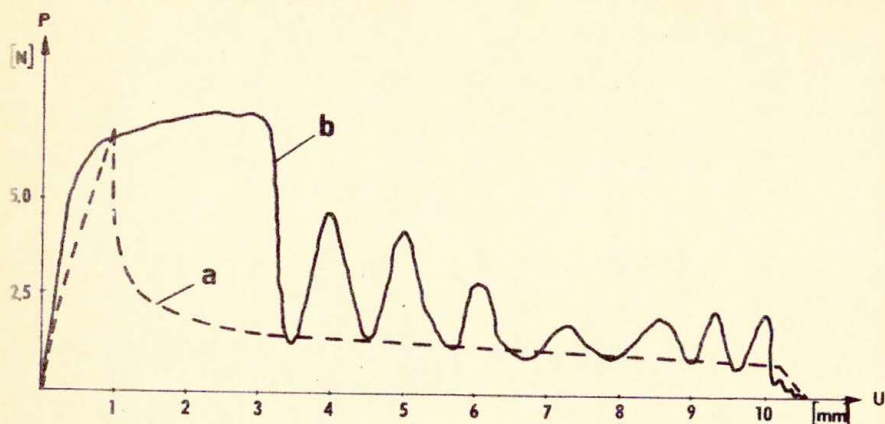
Wykresy z rys. 5.24 c/ obserwowano w tych badaniach, w których $l_z \leq l_{cr}$ i włókna ulegały zerwaniu. Dla włókien wytwarzanych w IPPT z miękkiej stali o wytrzymałości $f_t = 500$ MPa taki wykres był obserwowany kiedy $l_z/d \geq 50$. Ten typ wykresu można podzielić na dwie charakterystyczne części. Pierwsza /I/ to sprężyste odkształcenie włókna do chwili osiągnięcia przez nie granicy plastyczności. Druga część wykresu /II/ odpowiada uplastycznieniu się włókna i jest ograniczona wartością siły, przy której włókno się zerwie.

Wykresy typu d/ obserwowano podczas wyciągania nagniatanych włókien wytwarzanych w IPPT. Wykresy te można podzielić na trzy charakterystyczne części. Pierwsza część /I/ odpowiada sprężystemu odkształceniu swobodnego odcinka włókna aż do momentu zapoczątkowania procesu odspojenia. Druga część /II/ odpowiada niszczeniu mechanicznych zakotwień pomiędzy nagniatanym włóknom a matrycą. Trzecia część wykresu /III/ odpowiada przenoszeniu obciążenia z włókna na matrycę poprzez ścinanie i tarcie.

Wykresy typu e/ obserwowano podczas wyciągania włókien

haczykowatych /Bekaert/. Wykresy te można podzielić na cztery charakterystyczne części. Dwie pierwsze to sprężyste odkształcenie swobodnego odcinka pręta z odspojeniem się włókna do haczyka i odspojenie się samego haczyka. Trzecia część odpowiada prostowaniu się samego haczyka /jest to hipoteza autora/. Czwarta część wykresu to wyciąganie włókna i przekazywanie obciążeń z włókna na matrycę poprzez ścinanie i tarcie. Dla włókien haczykowatych Bekaerta /0,4 x 30 mm/ odspajanie do haczyka występowało przy przemieszczeniu około 30 N co odpowiadało przyczepności τ około 1,8 MPa. Natomiast maksymalna siła wyciągająca rejestrowana na ogół była w trzeciej części wykresu przy przemieszczeniach 1,0 do 1,6 mm i wynosiła około 53 N. Odpowiadająca maksymalna wartość przyczepności nominalnej wynosiła około 5,35 MPa. Interesujące jest, że przy przemieszczeniu około 5 mm siła jaka jest rejestrowana wynosi około 27 N, co odpowiada przyczepności 2,8 MPa. Oznacza to, że haczykowane włókno przechodzące przez rozwartą rysę o szerokości 10 mm może ciągle przenosić to samo obciążenie co przed powstaniem zarysowania.

Pouczające jest zestawienie i porównanie wykresów jakie otrzymano podczas wyciągania różnych typów włókien /rys.524./ Widać stąd między innymi, że niezależnie od przyczepności nominalnej poszczególne typy włókien mogą mieć bardzo różne energie wyciągania. Jeżeli przykładowo porównać wykres wyciągania włókna gładkiego i nagniatanego /rys.5.25. /, to można stwierdzić, że nie ma wielkich różnic w wielkości siły wyciągającej włókno natomiast jest istotna różnica w ilościach pracy koniecznej do wyciągnięcia włókien, obliczonych jako pola pod krzywymi. Do wyciągnięcia nagniatanego włókna potrzebne jest zużycie 360 Nmm, natomiast dla włókna gładkiego 220 Nmm. Okazuje się zatem na podstawie tej obserwacji, że nagniatane włókna mają wpływ przede wszystkim na końcowe parametry wytrzymałościowe fibrobetonu, takie jak wytrzymałość na rozciąganie, zginanie i uderność. Natomiast obciążenie wywołujące rozwarcie pierwszej rysy prawdopodobnie nie jest zależne od rodzaju powierzchni włókien.



Rys.5.25. Typowe wykresy przy wyciąganiu włókna gładkiego a/ oraz nagniatanego b/ /włókna produkcji IPPT 0,4 x 20 mm/

Prace cytowane w rozdziale 5.

- 5.1. Kompozyty betonowe ich struktura i własności mechaniczne red. A.M. Brandt. Ossolineum 1974,
- 5.2. B. MALMBERG, A. SKARENDAL. Method of studing the cracking of fibre concrete under restrained shrinkage, RILEM symposium, Testing and tests Methods of fibre cement composites. The Construction Press, 1978.
- 5.3. Z. JAMROZY, Lightweight aggregate concrete with steel fibre admixture. RILEM symposium Testing and tests Methods of fibre cement composites. The Construction Press, 1978.
- 5.4. R. BABUT. Rentgenogramy próbek fibrobetonowych, praca niepublikowana.
- 5.5. J. KASPERKIEWICZ, Fibre spacing in steel fibre reinforced composites, Matériaux et Constructions vol 10 Nr 55. 1977.
- 5.6. J. KASPERKIEWICZ, Reinforcement parameter for fibre concrete, Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences vol 26 nr 1, 1978.

- 5.7. B. MAYFIELD, B. ZELLY, Steel fibre treatment to improve bonds, Concrete, vol 7, nr 3 1973.
- 5.8. A.M. PAILLÈRE, J.J. SERANO, Vers un nouveau béton armé. Bull.Laison Labo. P.et Ch. 72, 18-24 jull-août 1974.

6. Badanie wyciągania grup włókien.

6.1. Wpływ kąta α między włóknami a siłą wyciągającą.

Aby stwierdzić jak wpływa kąt między włóknami a kierunkiem działania siły, na wartość siły wyrwywającej, przeprowadzono badania grup włókien /serie G-1, G-2/. Technika badania przyczepności grup włókien różni się od badania przyczepności włókien pojedynczych /rozd.4./ i odpowiada bardziej rzeczywistemu stanowi naprężenia w elementach fibrobetonowych między innymi ze względu na to, że włókna są obustronnie zakotwione w matrycy i w przekroju rysy znajduje się wiele włókien, które oddziałują wzajemnie na siebie.

Na podstawie uzyskanych wartości sił wyrwywających określono wartości przyczepności nominalnej grupowej τ_{gr} przy czym wobec tego, że włókno jest nachylone pod kątem α do kierunku działania siły, przyczepność nominalną należy obliczać jako iloraz składowej siły wyrwywającej na oś włókna przez powierzchnię styku włókna z matrycą tzn.:

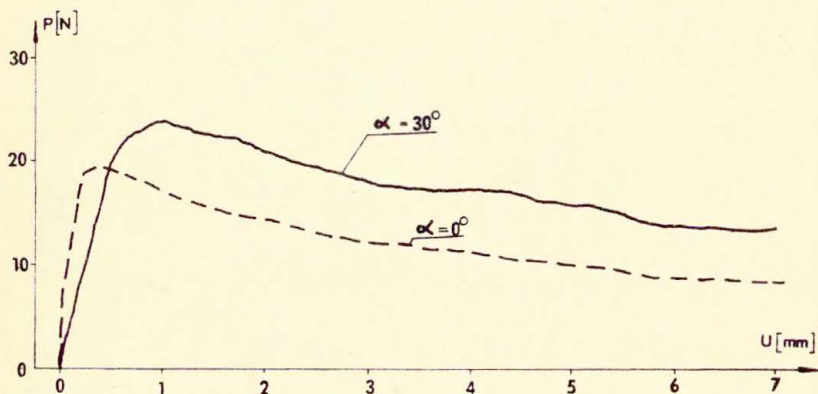
$$/6.-1./ \quad \tau_{gr} = \frac{P_{gr} \cdot \cos \alpha}{n \cdot \pi \cdot d \cdot l_z},$$

przy założeniu równomiernego rozkładu siły na wszystkie włókna.

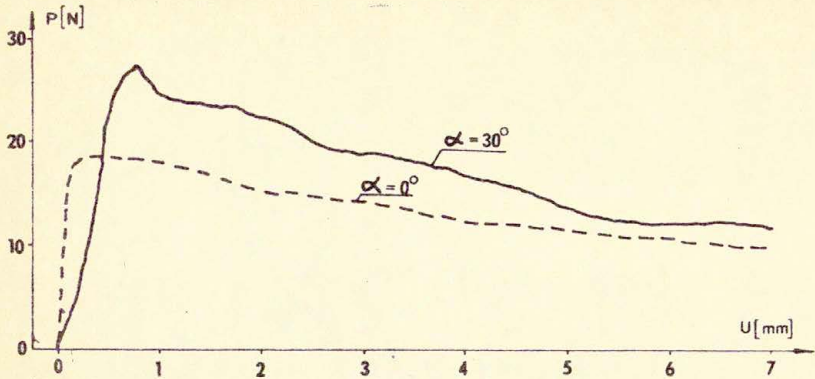
Badania przyczepności grupowej przeprowadzono stosując włókna o średnicy $d = 0,5$ mm i długości $l = 40$ mm. Badania ograniczono do kąta $\alpha = 30^\circ$, porównując uzyskane wyniki z wynikami badań odpowiednich próbek, w których $\alpha = 0^\circ$, tzn. przy równoległych kierunkach włókien i działania siły wyciągającej. Badania te przeprowadzono przy różnych wartościach procentu uzbrojenia β . Wyniki liczbowe badań zestawione są w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Wpływ kąta α na przyczepność w grupach.

Procent uzbroj. [%]	Liczba włókien w przekroju	Kąt α					
		$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 30^\circ$		
		P_{max} [kN]	$P_{g,max}$ [N]	$\bar{\sigma}_{gr}$ [MPa]	P_{max} [kN]	$P_{g,max}$ [N]	$\bar{\sigma}_{gr}$ [MPa]
0,37	40	0,80	20,0	0,637	0,98	24,5	0,675
0,57	67	1,25	18,7	0,595	1,96	29,3	0,805
1,23	133	6,36	47,8	1,522	7,22	54,3	1,496



Rys.6.1. Wykres sił grupowych jednostkowych P_{gr} w funkcji przemieszczenia u przy różnym kącie α między włóknem a kierunkiem obciążenia przy $\beta = 0,37\%$.

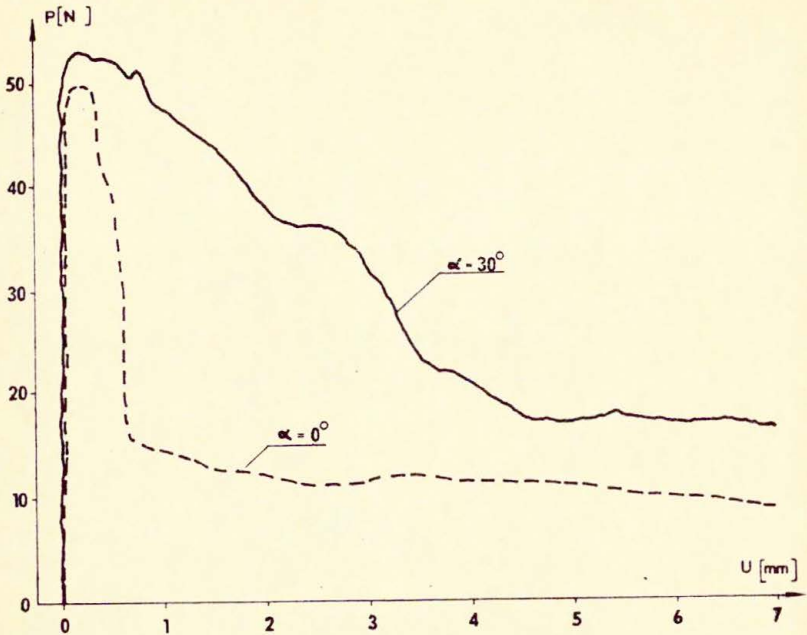


Rys.6.2. Wykres sił grupowych jednostkowych P_{gr} w funkcji przemieszczenia u przy różnym kącie α między włóknem a kierunkiem obciążenia, przy $\beta = 0,57\%$.

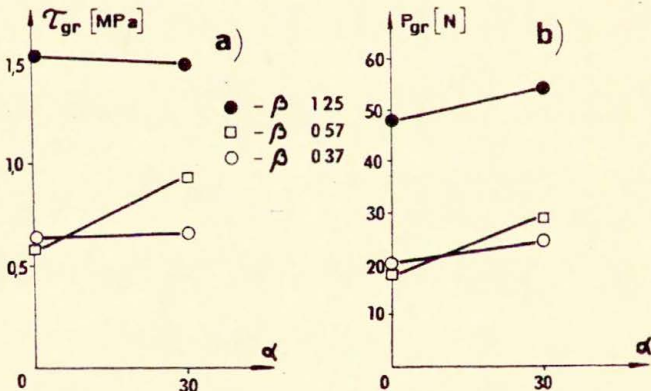
Na rys. 6.1, 6.2, 6.3. porównane są wykresy zależności między przemieszczeniem u a siłą P_{gr} w przeliczeniu na jedno włóknio przy kątach $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 30^\circ$, oraz przy różnych procentach uzbrojenia. Z tabeli 6.1. i rys. 6.4. wynika, że przyrost sił wrywających włóknio pod kątem $\alpha = 30^\circ$ jest wyraźny, natomiast nie ma wzrostu przyczepności nominalnej. Obniżona wartość przyczepności nominalnej przy $\alpha = 0^\circ$ i $\beta = 0,57\%$ wydaje się być przypadkowa.

Tabela 6.2. Wpływ kąta α na energię wywleknięcia U przy różnym procencie uzbrojenia.

β	Energia wywleknięcia U $Nm \times 10^{-3}$		Przyrost energii wywleknięcia [%] U
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	
0,37	0,079	0,093	18,5
0,57	0,080	0,119	47,8
1,23	0,083	0,193	134,0



Rys.6.3. Wykres sił grupowych jednostkowych P_{gr} w funkcji przemieszczenia U przy różnym kącie α między włóknem a kierunkiem obciążenia, przy $\beta = 1,23\%$



Rys.6.4. Zależność przyczepności nominalnej a/ i siły wyrwającej b/ przy badaniach grupowych, od kąta α między włóknem a kierunkiem działania siły.

Jeżeli porównać energię U zużyta na wywleczenie włókien /tabela 6.2./ to okazuje się, że wpływ kąta α jest bardzo wyraźny. Widać z powyższej tabeli, że przyrost energii wywlekania zużytej na rozwarcie rysy do 7 mm, w sposób istotny zależy od kąta α między osią włókna zakotwionego a kierunkiem działania siły wyrwywającej.

Na podstawie przeprowadzonych badań można więc stwierdzić, że zwiększenie kąta pomiędzy włóknom a kierunkiem wyciągania do $\alpha = 30^\circ$, powoduje powiększenie o 14% do 57% siły potrzebnej do spowodowania utraty przyczepności w zależności od procentu uzbrojenia matrycy, równocześnie następuje wzrost energii potrzebnej na wyciągnięcie jednego włókna o 19% do 134%.

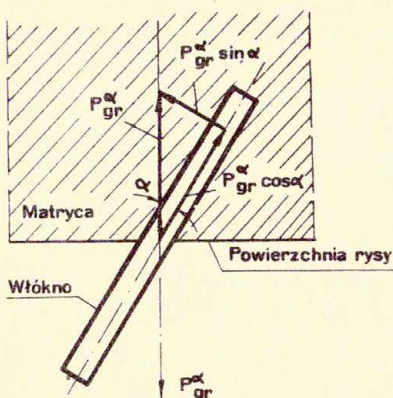
Brak wyraźnego przyrostu przyczepności nominalnej przy wzroście siły wyrwywającej włókno i energii wywlekania U jeżeli oś włókna odchylona jest od kierunku działania siły o kąt α tłumaczy się tym, że o przyczepności nominalnej decyduje siła działająca wzdłuż osi włókna / rys.6.5. /.

Aby zatem spowodować odspojenie włókien od matrycy, należy przyłożyć odpowiednio siłę taką aby $P_{gr}^d \cdot \cos \alpha = P_{gr}^o$. Jak widać z rys. 6.5. wyciąganie włókna, którego oś jest odchylona pod kątem α do kierunku przyłożonej siły, wywołuje dodatkową reakcję prostopadłą do osi włókna równą $P_{gr}^d \cdot \sin \alpha$.

Reakcja ta powoduje dociskanie wywlekanych włókien do matrycy. Okazuje się, że docisk poprzeczny nie wpływa na wartość siły powodującej odspojenie włókien. Natomiast występowanie tego docisku zwiększa znacznie siłę w okresie późniejszym podczas wywlekania włókien i przewyciężania oporów tarcia wzdłuż powierzchni odspojenia. Jest oczywiste że siły tarcia rosną wobec występowania docisku poprzecznego.

Wyniki przeprowadzonego badania wskazują na większą efektywność włókien rozmieszczonych przypadkowo w matrycy niż to wynikałoby ze zwykłych badań typu pull-out przy $\alpha = 0^\circ$. Spostrzeżenie to oraz próba ilościowej oceny wpływu kąta $\alpha \neq 0^\circ$ pozwala na wyjaśnienie liczbowych niezgodności

występujących w różnych badaniach elementów fibrobetonowych.

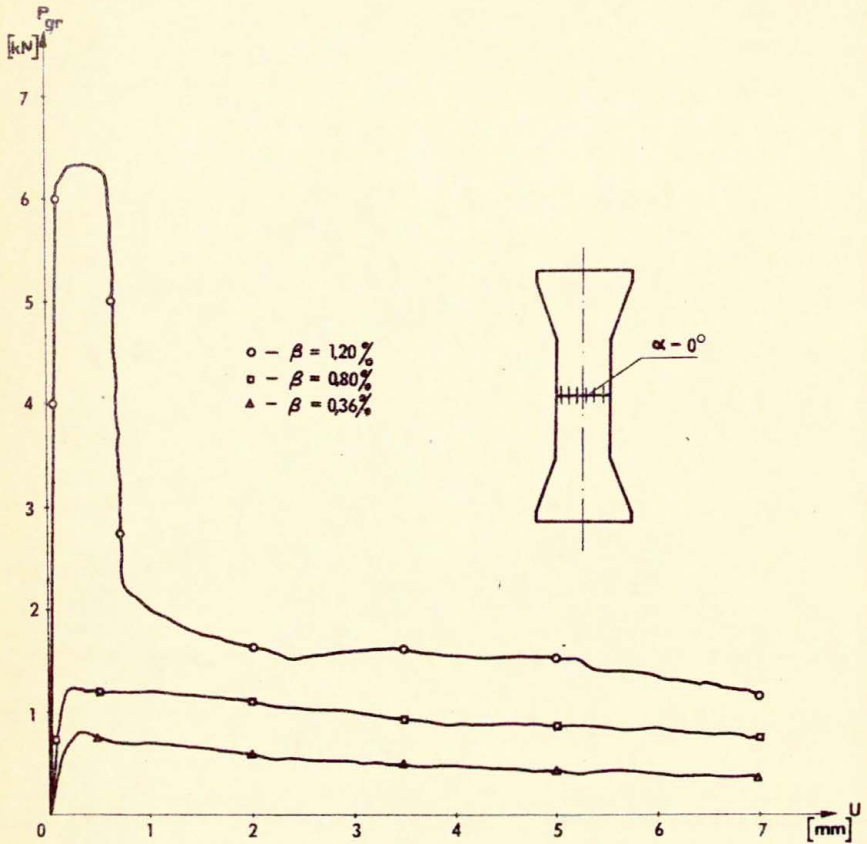


Rys. 6.5. Rozkład sił działających na włókno odchylone od kierunku działania siły wyciągającej grupowej P_{gr}^{α} o kąt α .

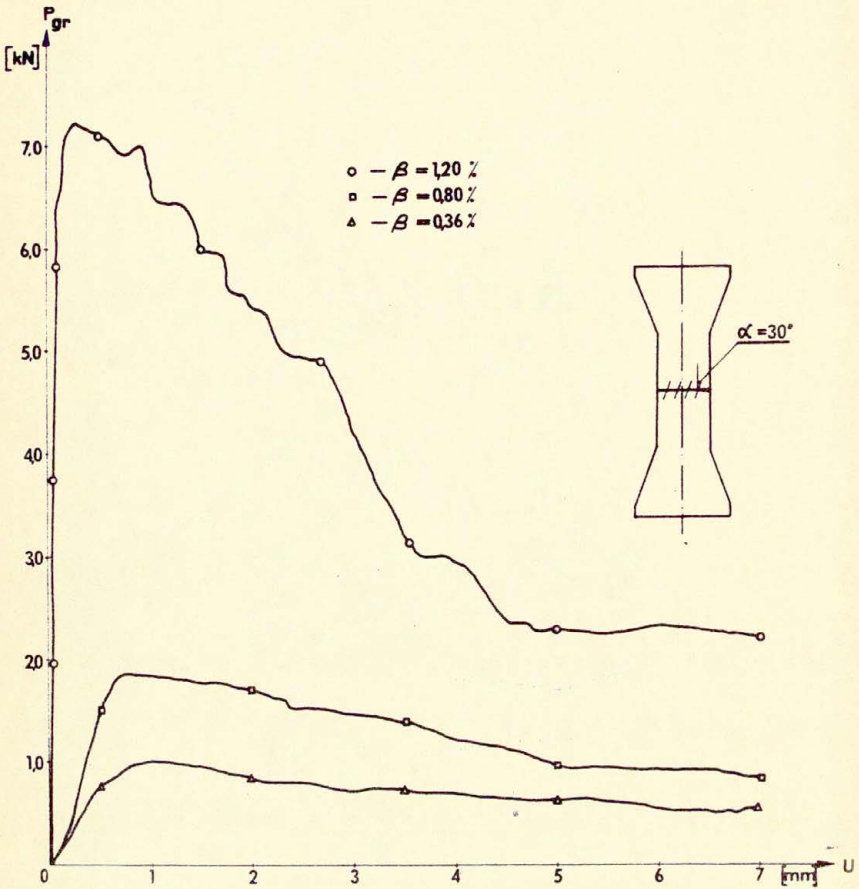
Należy się spodziewać, że istnieje pewien graniczny kąt α_{cr} powyżej, którego nie następuje wyciąganie włókna. Przy odpowiednio dużej wartości α wskutek przekroczenia naprężeń ścinających w matrycy w kierunku prostopadłym do osi włókna, włókno przecina jak gdyby matrycę i w ten sposób odspaja się. Aby określić wielkość tego kąta, konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych badań.

6.2. Wpływ procentu uzbrojenia w przekroju na przyczepność.

Badanie wpływu procentu uzbrojenia β na przyczepność i energię wywlekania U przeprowadzono równocześnie z prowadzonym badaniem nad wpływem kąta α na przyczepność włókien w grupie. Na rys. 6.6. i 6.7. przedstawione są wykresy uzyskane podczas badań przy różnych procentach.

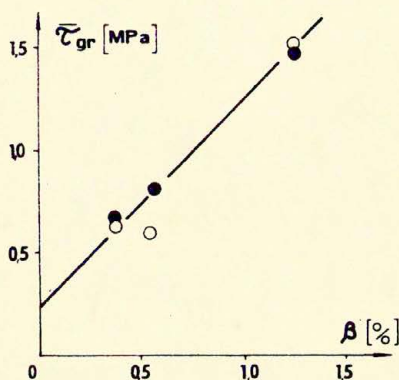


Rys. 6.6. Wykresy sił grupowych P_{gr} dla różnych procentów uzbrojenia matrycy przy badaniach grupowych, kąt nachylenia włókien względem kierunku rozciągania $\alpha = 0^\circ$.

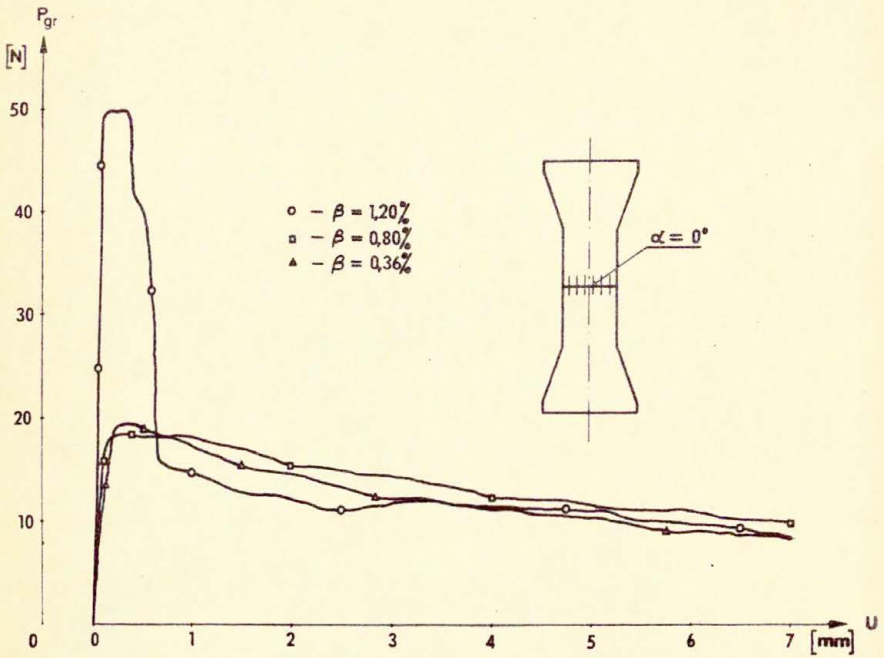


Rys. 6.7. Wykresy sił grupowych P_{gr} dla różnych procentów uzbrojenia matrycy przy badaniach grupowych, kąt nachylenia włókna względem kierunku rozciągania $\alpha = 30^\circ$.

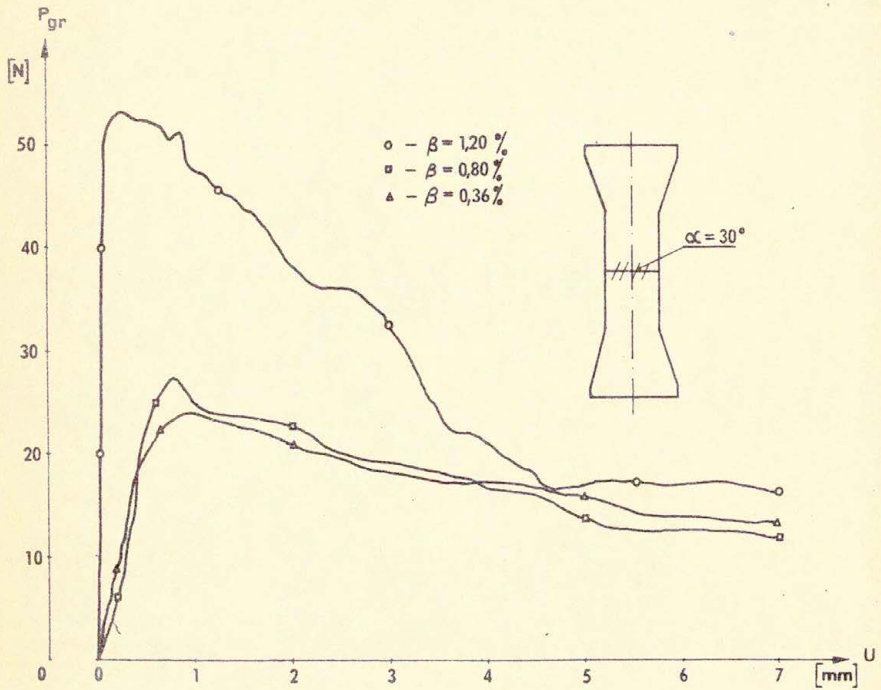
uzbrojenia zarówno badanego przekroju jak i matrycy, / $\beta = 0,37, 0,57; 1,23$ / Badania te przeprowadzono przy dwóch wartościach kąta $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 30^\circ$. Na rysunkach 6.7 i 6.9 przedstawiono wyniki w przeliczeniu na siłę przypadającą na jedno włókno. Widać tutaj wyraźnie, że w miarę wzrostu procentu uzbrojenia wzrasta również siła przypadająca na jedno włókno a zatem i przyczepność nominalna τ_{gr} /rys. 6.8./. Ta obserwacja jest analogiczna z tą jaką poczyniono w przypadku badania włókien pojedynczych. Wzrost wynika prawdopodobnie ze zwiększenia wytrzymałości matrycy i jej odporności na zarysowanie przez dodawanie coraz większych ilości włókien.



Rys.6.8. Wpływ procentu uzbrojenia matrycy na przyczepność nominalną τ_{gr} .



Rys. 6.9. Wykres sił przypadających na jedno włókno P_{gr} w badaniach grupowych przy różnych procentach uzbromienia badanego przekroju $\alpha = 0^\circ$.



Rys.6.10. Wykres sił przypadających na jedno włókno P_{gr} w badaniach grupowych przy różnych procentach uzbrojenia badanego przekroju $\alpha = 30^\circ$.

Przyrost siły wyrywającej P jest taki sam zarówno dla włókien równoległych do kierunku działania siły jak i dla włókien skierowanych pod kątem $\alpha = 30^\circ$ /tabela 6.3./.

Tabela 6.3. Wpływ procentu uzbrojenia na przyczepność nominalną τ_{gr} wyrażony w procentach.

β	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
0,37	100%	100%
0,57	94%	120%
1,23	239%	221%

Jeżeli natomiast porównać energię wywlekania U to z powyższych badań /tabela 6.2./, wynika, że znaczny jej przyrost występuje wtedy gdy włókna odchylone są od kierunku działania siły wyciągającej o kąt $\alpha = 30^\circ$. Na wzrost energii U mają tu wpływ występujące dość duże siły dociskające włókno do matrycy. Siły te działające prostopadle w stosunku do osi włókna, oddziałują również na sąsiadujące włókna powodując powiększenie energii wywlekania w skutek powiększenia tarcia między włóknem i matrycą.

Z powyższych badań wynika, że przy badaniu przyczepności włókien stalowych w fibrobetonie konieczne jest, obok badań pojedynczych włókien prowadzenie badania wyciągania grup włókien. Dopiero dzięki zespołowi tych badań okazało się możliwe właściwe ocenienie wpływu poszczególnych parametrów na przyczepność. Uzyskane przy tym wartości liczbowe wykorzystywane są do innych badań prowadzonych równolegle w PPO.

7. Rozkład naprężeń we włóknie i w strefie przejściowej włókno-matryca.

7.1. Wybór modelu teoretycznego.

Istnieje szereg rozwiązań teoretycznych, dotyczących rozkładu naprężeń we włóknie i na styku włókno-matryca w materiałach, w których matryce z metali lub tworzyw sztucznych są uzbrojone włóknami kruchymi o wysokich wytrzymałościach, jak na przykład włóknami borowymi, węglowymi, czy też whiskersami szafirowymi [7.1], [7.2], [7.3], [7.4]. Ze względu na różnice odkształcalności obu tych faz kompozytów a także wobec doskonałej przyczepności matrycy do włókien, współdziałanie włókien z matrycą następuje również przy małych obciążeniach i ma zupełnie odmienny przebieg niż w fibrobetonie.

Wobec małych odkształceń granicznych matrycy cementowej w porównaniu z odkształceniami włókien stalowych $\epsilon_m^u \ll \epsilon_f^u$ a także wskutek niskiego procentu uzbrojenia $\beta < 3\%$, włókna współdziałają efektywnie z matrycą dopiero po wystąpieniu rys. W okresie początkowego obciążenia, jak to stwierdzono na licznych badaniach między innymi czystego zginania [7.5] i bezpośredniego rozciągania [7.6], odkształcalność elementów fibrobetonowych była taka sama jak elementów z matrycy nieuzbrojonej.

Z tych powodów nie wydaje się możliwe zastosowanie wyżej wymienionych rozwiązań teoretycznych do analizy procesu zachowania się włókien stalowych w fibrobetonie, przedstawionego w poprzednich rozdziałach na podstawie badań doświadczalnych. Charakterystyczną cechą tego procesu jest postępujące odspojenie a następnie przemieszczenie włókna w matrycy, powstrzymywane jedynie przez tarcie.

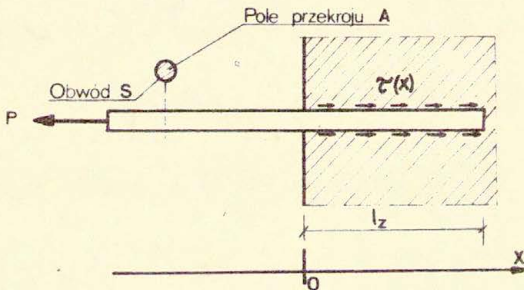
Postępujące odspojenie włókna ma zasadnicze znaczenie dla wytrzymałości i odkształcalności elementów, ponieważ rysy powstają i propagują się sukcesywnie i przez to odkształcenia fibrobetonu są jak gdyby quasi-plastyczne. Następnym etapem -

przemieszczenia i tarcie - dotyczą już gałęzi opadającej wykresu obciążenie-odkształcenie /np.rys.6.6./.

Odspojenie włókna w matrycy zostało w uproszczonej postaci przedstawione przez Sokołowskiego w pracy [7.7], w której rozpatrywano wyciągania półnieskończonego pręta z półprzestrzeni sprężystej. Autor niniejszej rozprawy zmienił warunki brzegowe w rozwiązaniu Sokołowskiego, wprowadzając włókno o skończonej długości i wyznaczył rozkład naprężeń we włóknie i w strefie przejściowej włókno-matryca w kilku badanych przypadkach.

7.2. Wyprowadzenie równań opisujących rozkład naprężeń w strefie przejściowej włókno-matryca i we włóknie.

Rozważmy skończony pręt sprężysty /włókno/ o długości zakotwienia l_z wyciągany z siłą $P = A \cdot \bar{\epsilon}$ z półprzestrzeni sprężystej /rys.7.1/. Zagadnienie jest jednowymiarowe, tzn. wszystkie zmienne wielkości zależą tylko od współrzędnej wzdłuż osi pręta. Zakładamy dalej, że pręt jest nieodkształ-



Rys.7.1. Schemat pręta wyciąganego z matrycy.

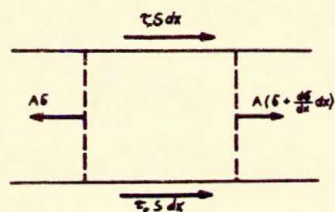
całny w kierunku prostopadłym do jego osi, tzn. że współczynnik Poissona $\nu = 0$. Pomiędzy matrycą a prętem istnieją

tylko oddziaływania sił stycznych, natomiast po odspojeniu nie ma żadnego oddziaływania tak, jak gdyby matryca zanikała wraz z odspojeniem włókna. Przyjęto również, że zachodzi liniowy związek pomiędzy naprężeniem stycznym τ_p na powierzchni pręta /naprężeniem przyczepnościowym/, a przemieszczeniem u pręta w punkcie x :

$$/7.-1./ \quad \tau_p(x) = -k \cdot u(x) .$$

Jest to zasadnicze założenie w rozpatrywanym modelu, analogiczne np. do założenia Winklera w zagadnieniach posadowienia na podatnym podłożu. Przyjęcie tu innej zależności niż liniowa nie wydaje się bardziej uzasadnione fizycznie a prowadzi do poważnych komplikacji obliczeniowych, uniemożliwiających efektywne posługiwanie się wyprowadzonymi wzorami do analizy wyników doświadczalnych. Utrata przyczepności na styku włókno-matryca następuje po osiągnięciu granicznej wielkości przemieszczenia pręta $u(x) = u_{cr}$.

Rozważmy równowagę odcinka włókna o długości dx /rys.7.2/.



Rys. 7,2. Siły działające na wycinek włókna o długości dx .

Równanie równowagi przedstawia się następująco:

$$/7.-2./ \quad A \cdot \delta - A \cdot \delta - A \cdot \frac{d\delta}{dx} \cdot dx - \tau_p \cdot S \cdot dx = 0 .$$

Osiowe odkształcenie $\frac{du}{dx}$ włókna jest równe:

$$/7.-3/ \quad \frac{du}{dx} = \frac{\sigma}{E_f} .$$

Korzystając z powyższej zależności oraz uwzględniając /7.-1/, zależność /7.-2/ przyjmuje postać równania różniczkowego:

$$/7.-4/ \quad A \cdot E_f \cdot \frac{d^2u}{dx^2} \cdot dx - k \cdot u(x) \cdot S \cdot dx = 0 ,$$

po czym wprowadzając parametr:

$$/7.-5/ \quad H = \sqrt{\frac{E_f \cdot A}{k \cdot S}} ,$$

otrzymujemy:

$$/7.-6/ \quad \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{u}{H^2} = 0 .$$

Powyższe równanie obowiązuje na odcinku włókna $x > 0$, natomiast na odcinku włókna $x < 0$ gdzie $\sigma_p \equiv 0$ /rys.7.1/, równanie powyższe sprowadza się do postaci:

$$/7.-7/ \quad \frac{d^2u}{dx^2} = 0 .$$

Oznaczając rozwiązanie na odcinku $x < 0$ przez $u_I(x)$ oraz na odcinku $x > 0$ przez $u_{II}(x)$, otrzymujemy rozwiązania równań /7.-6/ i /7.-7/ w postaci następującej:

$$/7.-8/ \quad u_I(x) = C_1 \cdot x + C_2 ,$$

$$/7.-9/ \quad u_{II}(x) = B_1 \cdot \exp\left(-\frac{x}{H}\right) + B_2 \cdot \exp\left(\frac{x}{H}\right) .$$

Stałe B i C w równaniach wyznaczamy z następujących warunków brzegowych:

- / i / przy $x < 0$ zachodzi $\sigma_I(x) = \sigma_0$,
- / ii / przy $x = L_x$ zachodzi $\sigma_{II}(x) = 0$,
- /iii / przy $x = 0$ zachodzi $\sigma_{II}(x) = \sigma_0$,

/iv/ przy $x = 0$ zachodzi $u_I(x) = u_{II}(x)$.

Warunek brzegowy /ii/ jest z oczywistych powodów różny niż w rozwiązaniu Sokołowskiego [7.7].

Z warunku brzegowego /i/, różniczkując równanie /7-8/ i korzystając z prawa Hooke'a, wyznaczamy stałą C_1 :

$$/7.-11/ \quad \frac{du_I}{dx} = C_1, \quad \sigma(x) = E_f \cdot \frac{du_I}{dx} \Rightarrow C_1 = \frac{\tilde{\sigma}_0}{E_f}.$$

Z warunku brzegowego /iii/ i różniczkując równanie /7-9/ oraz korzystając z prawa Hooke'a, wyznaczamy zależność na stałą B_2 w funkcji stałej B_1 :

$$/7.-12/ \quad \frac{du_{II}}{dx} = -\frac{1}{H} \cdot B_1 \cdot \exp\left(-\frac{x}{H}\right) + \frac{1}{H} \cdot B_2 \cdot \exp\left(\frac{x}{H}\right),$$

$$\sigma_{II}(x) = E_f \cdot \frac{du_{II}}{dx} \Big|_{x=l_2} \Rightarrow B_2 = B_1 \exp\left(-\frac{2l_2}{H}\right).$$

Z warunku brzegowego /iii/, różniczkując równanie /7-8/ i korzystając z prawa Hooke'a oraz równania /7-12/ wyznaczamy stałą B_1 :

$$/7.-13/ \quad \frac{du_{II}}{dx} = -\frac{1}{H} \cdot B_1 \cdot \exp\left(-\frac{x}{H}\right) + \frac{1}{H} \cdot B_1 \cdot \exp\left(\frac{x-2l_2}{H}\right),$$

$$\sigma_{II}(x) = E_f \cdot \frac{du_{II}}{dx} \Big|_{x=0} \Rightarrow B_1 = \frac{\tilde{\sigma}_0 \cdot H}{E_f \cdot [\exp(-\frac{2l_2}{H}) - 1]}$$

Na podstawie /7-12/ wykorzystując /7-13/ wyznaczamy stałą B_2 :

$$/7.-14/ \quad \left. \begin{aligned} B_1 &= \frac{\tilde{\sigma}_0 \cdot H}{E_f \cdot [\exp(-\frac{2l_2}{H}) - 1]} \\ B_2 &= B_1 \cdot \exp\left(-\frac{2l_2}{H}\right) \end{aligned} \right\} B_2 = \frac{\tilde{\sigma}_0 \cdot H}{E_f [1 - \exp(-\frac{4l_2}{H})]}.$$

Z warunku brzegowego /iv/ wyznaczamy stałą C_2 :

$$/7.-15/ \left. \begin{aligned} u_I(x) \Big|_{x=0} &= \frac{\tilde{\sigma}_c}{E_f} \cdot 0 + C_2, \\ u_{II}(x) \Big|_{x=0} &= -H \cdot \frac{\tilde{\sigma}_c}{E_f} \cdot 1, \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_2 = -H \cdot \frac{\tilde{\sigma}_c}{E_f}.$$

Równania przemieszczeń mają zatem postać następującą:

$$/7.-16/ \quad u_I(x) = \frac{\tilde{\sigma}_c}{E_f} \cdot x + \frac{\tilde{\sigma}_c \cdot H}{E_f} \left(\frac{1 + \exp \frac{2Lx}{H}}{1 - \exp \frac{2Lx}{H}} \right),$$

$$/7.-17/ \quad u_{II}(x) = \frac{\tilde{\sigma}_c \cdot H}{E_f} \left[\frac{\exp(-\frac{x}{H})}{\exp(-\frac{2Lx}{H}) - 1} + \frac{\exp \frac{x}{H}}{1 - \exp \frac{2Lx}{H}} \right].$$

Rozkład naprężeń we włóknie przy uwzględnieniu /7.-3/ dany jest równaniami:

$$/7.-18/ \quad \tilde{\sigma}_I(x) = \tilde{\sigma}_c,$$

$$/7.-19/ \quad \tilde{\sigma}_{II}(x) = \tilde{\sigma}_c \left[\frac{\exp(-\frac{x}{H})}{1 - \exp(-\frac{2Lx}{H})} + \frac{\exp \frac{x}{H}}{1 - \exp \frac{2Lx}{H}} \right].$$

Na podstawie /7-1/ równanie na naprężenia styczne ma postać:

$$/7.-20/ \quad \tau_p(x) = \frac{\tilde{\sigma}_c \cdot k \cdot H}{E_f} \cdot \left[\frac{\exp(-\frac{x}{H})}{1 - \exp(-\frac{2Lx}{H})} + \frac{\exp \frac{x}{H}}{\exp \frac{2Lx}{H} - 1} \right].$$

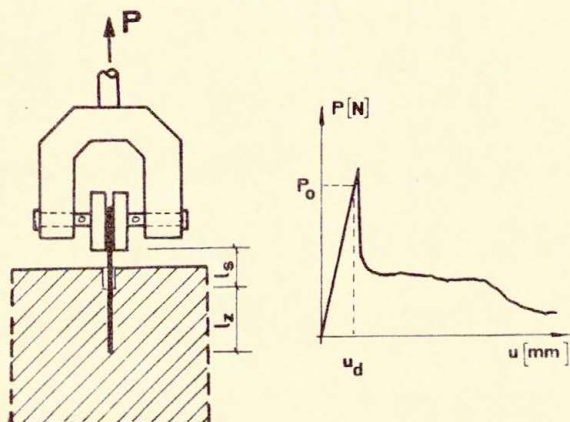
Ostatnie dwie zależności pozwalają na wyznaczenie rozkładu naprężeń we włóknie i naprężeń przyczepnościowych. W tym celu konieczne jest obliczenie na podstawie badań doświadczalnych parametrów H i k . Do obliczania numerycznego $\tau_p(x)$ i $\tilde{\sigma}(x)$ opracowano program na kalkulator SR-56 Texas Instruments, jest on podany w Załączniku 2.

7.3. Określenie parametrów H i k w oparciu o badania przyczepności pojedynczych włókien.

Do wyznaczenia rozkładu naprężeń $\tau(x)$ i $\sigma(x)$ w określonych warunkach potrzebne są parametry H i k . Parametr H można wyznaczyć z równania /7-17/ przy $x = 0$:

$$/7.-21/ \quad u_{II}(x) \Big|_{x=0} = \frac{\tilde{\sigma}_0 \cdot H}{E_f} \cdot \left(\frac{1 + \exp \frac{2l_z}{H}}{1 - \exp \frac{2l_z}{H}} \right).$$

Do rozwiązania powyższego równania, konieczne jest przede wszystkim uzyskanie z doświadczenia wartości $u_0(x) \Big|_{x=0}$, która jest rzeczywistym przemieszczeniem włókna przy sile wyciągającej włókno $P \leq P_{max}$. Siłę P i przemieszczenie $u_z(x) \Big|_{x=0}$ można uzyskać z badań wyciągania pojedynczego włókna, /rys.7.3/.



Rys.7.3. Badanie przyczepności włókien stalowych do matrycy cementowej, a/ schemat badania, b/ przykładowy wykres siły wyciągającej włókno P w funkcji przemieszczenia u .

Wielkość przemieszczenia uzyskana z doświadczenia u_d nie może być wstawiona do wzoru /7-21/, gdyż oprócz przemieszczenia poszukiwanego $u_{II}(x)|_{x=0}$ obejmuje także wydłużenia sprężystego swobodnego odcinka włókna u_{sp} oraz przemieszczenia pozorne u_{pz} , wynikające z błędu całego układu obciążającego i pomiarowego. Można więc wynik uzyskany z badań napisać w następującej postaci:

$$/7.-22/ \quad u_d = u_{II}(x)|_{x=0} + u_{sp} + u_{pz} \quad ,$$

stąd:

$$/7.-23/ \quad u_{II}(x)|_{x=0} = u_d - u_{pz} - u_{sp} \quad .$$

Swobodny odcinek włókna pomiędzy szczękami a matrycą ma długość l_s , skąd w zakresie sprężystym otrzymujemy:

$$/7.-24/ \quad u_{sp} = \frac{P_f \cdot l_s}{E_f \cdot A} \quad .$$

Celem określenia przemieszczenia pozornego u_{pz} , wynikającego z układu obciążającego i rejestrującego, dokonano pomiaru zrywania samego włókna. Stąd wyznaczono siłę P_f i odkształcenie w zakresie sprężystym u_{fd} odpowiadające sile, przy której następuje odspojenie. Przy danej sile można obliczyć korzystając z prawa Hooke'a rzeczywiste odkształcenie w zakresie sprężystym u_f swobodnego odcinka włókna o długości l_{sf} i wobec tego:

$$/7-25/ \quad u_{pz} = u_{fd} - u_{fsp} \quad ;$$

$$\text{gdzie} \quad u_{fsp} = \frac{P_f \cdot l_{sf}}{E_f \cdot A} \quad .$$

Ostatecznie $u_{II}(x)|_{x=0}$ można napisać w następującej postaci:

$$/7.-26/ \quad u_{II}(x)|_{x=0} = u_d - \frac{P_f \cdot l_s}{E_f \cdot A} - u_{pz} \quad .$$

Dla uproszczenia, zamiast $u_{\text{II}}(x)|_{x=0}$ wprowadzono dalej oznaczenie u_0 , oraz

$$/7.-27/ \quad \xi = \exp \frac{2 \cdot l \cdot z}{H} .$$

Możemy zatem wyznaczyć H w zależności od ξ :

$$/7.-28/ \quad \ln \xi = \frac{2 \cdot l \cdot z}{H} \Rightarrow H = \frac{2 \cdot l \cdot z}{\ln \xi} .$$

Ostatecznie korzystając z równań /7-27/ i /7-28/, równanie na przemieszczenie u_0 /7-21/ można napisać w następującej postaci:

$$/7.-29/ \quad u_0 = \frac{\sigma_0 \cdot 2 \cdot l \cdot z}{E_f \cdot \ln \xi} \cdot \left(\frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right) .$$

Powyższe równanie można rozwiązać w sposób przybliżony metodą Newtona uściślenia przybliżeń. Oznaczając:

$$/7.-30/ \quad f(\xi) = \frac{\sigma_0 \cdot 2 \cdot l \cdot z}{E_f \cdot \ln \xi} \cdot \left(\frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right) - u_0 ,$$

otrzymujemy:

$$/7.-31/ \quad f'(\xi) = \frac{\sigma_0 \cdot 2 \cdot l \cdot z}{E_f} \cdot \left(\frac{2 \ln \xi + \xi - \frac{1}{\xi}}{\ln \xi - \xi \ln \xi} \right) .$$

Aby znaleźć przybliżoną wartość pierwiastka ξ równania $f(\xi) = 0$ należy przyjąć pierwszą początkową wartość $\xi = \xi_0$ a następnie na podstawie metody Newtona za przybliżenie dokładniejsze przyjmuje się:

$$/7.-32/ \quad \xi_1 = \xi_0 - \frac{f(\xi_0)}{f'(\xi_0)} .$$

Zastępując ξ_0 przez ξ_1 można otrzymać następne przybliżenia ξ_2 i w ten sposób można obliczyć pierwiastek równania /7-3/ z dowolną dokładnością. Podstawiając do równania /7-32/ równanie /7-30/ i /7-31/ oraz dokonując odpowiednich przekształceń otrzymujemy:

$$/7.-33/ \quad \xi_1 = \xi_0 - \frac{(1 + \xi_0) \cdot (\ln \xi_0 - \xi_0 \cdot \ln \xi_0) - \frac{u_d \cdot E}{G_0 \cdot l_z} (\ln \xi_0 - \xi_0 \cdot \ln \xi_0)^2}{2 \cdot \ln \xi_0 + \xi_0 - \frac{1}{\xi_0}} .$$

Początkową wartość ξ_0 wyznaczamy z równania /7-27/ podstawiając wartość H obliczoną z rozwiązania wyciąganego półnieskończonego pręta z półprzestrzeni sprężystej [7.8], którą to wartość można obliczyć w sposób prosty z następującego równania:

$$/7.-34/ \quad H_\infty = - \left(u_d - \frac{P \cdot l_z}{E_c \cdot A} - u_{fd} - u_{fsp} \right) \cdot \frac{E_c \cdot A}{P} .$$

Po obliczeniu wielkości ξ z założoną dokładnością, parametr H wyznaczamy z równania /7-28/ a następnie na tej podstawie, korzystając z zależności /7-5/, obliczamy parametr k :

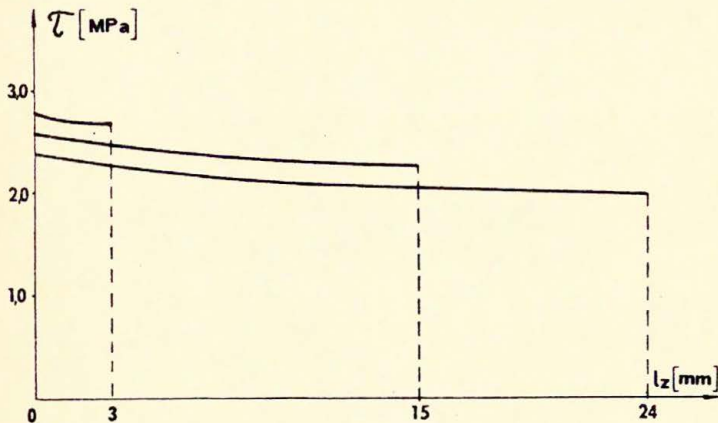
$$/7.-35/ \quad k = \frac{E_c \cdot d}{4 \cdot H^2} .$$

Parametry H i k jak widać z równań / 7.-34/ i /7-35/ zależą od wymiarów badanych włókien i wyników uzyskanych z doświadczeń, muszą być zatem wyznaczane każdorazowo po poszczególnych badaniach. Autor wykonał obliczenia tych parametrów przy użyciu kalkulatora SR-56 Texas Instruments. Program wraz z instrukcją użycia do obliczania H i k znajduje się w Załączniku 2.

7.4. Przykłady wyznaczania rozkładu naprężeń $\hat{\sigma}_p(x)$ i $\hat{\sigma}_x(x)$ z badań serii P-26.

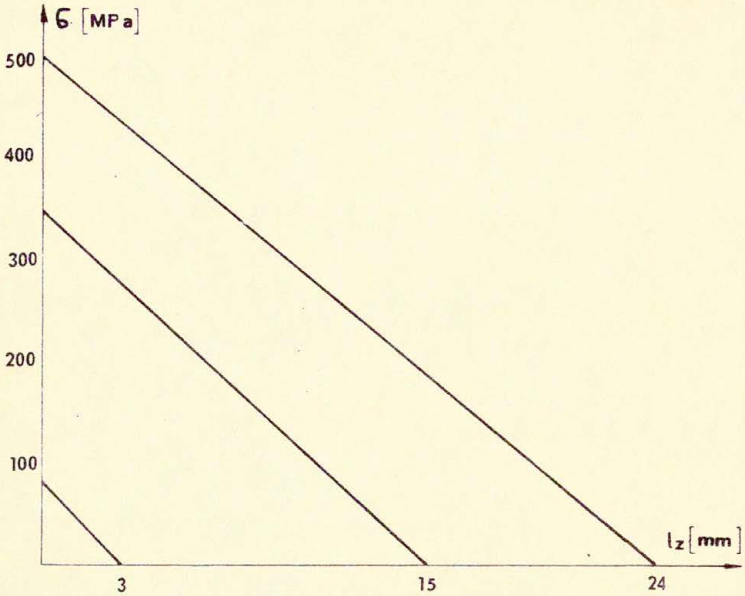
Korzystając z wzorów /7-19/ i / 7-20/ na $\hat{\sigma}_p(x)$ i $\hat{\sigma}_x(x)$ oraz ze sposobu obliczania parametrów H i k opisanego w rozdziale 7.3, wyznaczono rozkład naprężeń przyczepnościowych i rozciągających we włóknach na podstawie wyników badań serii P-26. W serii tej badano wpływ długości zakotwienia włókna na właściwość przyczepności nominalnej $\hat{\sigma}$. Do obliczeń wprowadzono wartości $P_{p,max}$ z tabeli 5.12, obliczenia wyko-

nano dla włókien o średnicy $d_n = 0,4$ mm i przy długości zakotwienia $l_z = 3, 15, 24$ mm. Wyniki uzyskane z obliczeń przedstawiono na wykresach podanych na rys. 7.4 i rys. 7.5.



Rys.7.4. Rozkład naprężeń przyczepnościowych wzdłuż włókna dla włókien IPPT o średnicy $d_n = 0,4$ mm i długości zakotwienia $l_z = 3, 15, 24$ mm.

Z rys. 7.4. widać, że zmiana naprężeń przyczepnościowych wzdłuż długości włókna jest nieznaczna. Przy przyjęciu równomiernego rozkładu naprężeń tzn. $\tau_p(x) = \text{const}$ na całej długości zakotwienia l_z , różnica pomiędzy maksymalną wartością $\tau_p(x)$ obliczoną przy założeniu $\tau_p(x) = -k u(x)$ jest również niewielka /tabela 7.1./.



Rys.7.5. Rozkład naprężeń rozciągających we włóknie, włókna IPPT o średnicy $d_n = 0,4$ mm i długości zakotwienia $l_z = 3, 15, 24$ mm.

Tabela 7.1. Zestawienie $\tau_{p \max}$ i $\tau_{p \min}$ oraz przyczepności nominalnej τ .

l_z [mm]	3	15	24
τ [MPa]	2,715	2,366	2,217
$\tau_{p \max}$ [MPa]	2,768	2,559	2,357
$\tau_{p \min}$ [MPa]	2,689	2,271	1,953

Długość zakotwienia l_z nie ma wpływu również na kształt wykresu naprężeń τ_p .

Powyżej przedstawione wyniki mogą posłużyć do próby weryfikacji przyjętej metody określania rozkładu naprężeń przyczepnościowych σ_p i naprężeń we włóknie σ .

Weryfikację przeprowadzono w ten sposób, że założono stały rozkład naprężeń przyczepnościowych σ_p , niezależny od długości zakotwienia, zgodnie z poprzednio sformułowanym wnioskiem. Naprężenie σ_p przyjęto z badań serii P-26 przy $l_z = 15$ mm i korzystając ze wzorów /7-1/ oraz /7-21/ wyznaczono siłę przy odpejaniu się włókna przy dwóch różnych długościach zakotwienia: $l_z = 3$ mm i $l_z = 24$ mm. Założono przy tym, że wielkość przemieszczenia $u_{\xi|_{z=0}}$ jest znana z pomiaru. Po wykorzystaniu tych równań i zależności /7-5/ otrzymano:

$$/7-35/ \quad \bar{P}^* = u_0 \pi \sqrt{\frac{\sigma \cdot E_f \cdot d^3}{4 \cdot (-u_0)}} \cdot \left(\frac{1 - \exp \lambda \cdot l_z \sqrt{\frac{4 \sigma}{E_f \cdot d \cdot (-u_0)}}}{1 - \exp \lambda \cdot l_z \sqrt{\frac{4 \sigma}{E_f \cdot d \cdot (-u_0)}}} \right) .$$

Obliczone wartości \bar{P}^* są następujące:

$$l_z = 3 \text{ mm} \quad \bar{P}^* = 8,838 \text{ N},$$

$$l_z = 24 \text{ mm} \quad \bar{P}^* = 62,850 \text{ N}.$$

Z badań tejże serii P-26 otrzymano:

$$l_z = 3 \text{ mm} \quad \bar{P}_{sp} = 10,312 \text{ N},$$

$$l_z = 24 \text{ mm} \quad \bar{P}_{sp} = 63,372 \text{ N}.$$

Po porównaniu wyników uzyskanych z doświadczeń z rezultatami powyższych obliczeń okazuje się, że błędy wynoszą 14,29% dla $l_z = 3$ mm i 0,75% dla $l_z = 24$ mm. Widać, że błąd jest stosunkowo niewielki w porównaniu do rozrzutów wyników jakie otrzymano w badaniach. Przyjęta metoda obliczania σ_p i σ może być uznana za miarodajną.

Porównując uzyskane rozwiązania z wynikami badań doświadczalnych dla żelbetu/rozdział 2 str. 15 - 17/ widać, że uzyskany rozkład naprężeń przyczepnościowych jest odmienny. Różnice te wynikają przede wszystkim z powodów wymienionych na str. 18, a dotyczących różnych warunków prętów i włókien w matrycy. Poza tym trzeba pamiętać, że wykresy naprężeń przyczepnościowych σ_p na rys.2.3. nie zostały uzyskane z bezpośrednich pomiarów a są wynikiem założeń i obliczeń przeprowadzonych na podstawie

pomierzonych odkształceń prętów.

Na podstawie powyższych rozważań, wielkość przyczepności nominalnej $\bar{\tau}$ wydaje się być dobrym miernikiem określającym w sposób prosty oddziaływanie na styku włókno matryca a przy tym znajduje potwierdzenie w przedstawionej powyżej analizie teoretycznej.

Zestawienie prac cytowanych w rozdziale 7.

- 7.1. H.L. COX, Brit J.App. Phys. nr 3 vol 72, 1972.
- 7.2. J. OUTWATER, Jr. OGDEN, Modern Plastics, March, 1956.
- 7.3. N.F. DOW, G.E.C. Missile and Space Division, Report no R 63 S D 61.
- 7.4. B.W.ROSEN, Fiber Composite Materials, A.S.M. publikation.
- 7.5. R. BABUT, Zginanie elementów z fibrobetonu z włóknem stalowym; Zeszyty problemowe techniki mostowej: "Kompozyty betonowe, Własności mechaniczne i zastosowania" SITKOM, Kielce - 1977, nr4.
- 7.6. J.KASPERKIEWICZ, Wytrzymałość i odkształcalność graniczna przy rozciąganiu fibrobetonu z włóknem stalowym, Mechanika Teoretyczna i Stosowana nr 1, 1979.
- 7.7. M. SOKOŁOWSKI, On a one-dimensional model of the fracture process, Rozprawy Inżynierskie tom 25, nr 2, 1977
- 7.8. A. BURAKIEWICZ, Rozkład przyczepności matrycy do włókna w kompozytach o matrycy kruchej. Aktualne problemy drutobetonu w Polsce, referaty na seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych P.K., Kraków, listopad 1978.

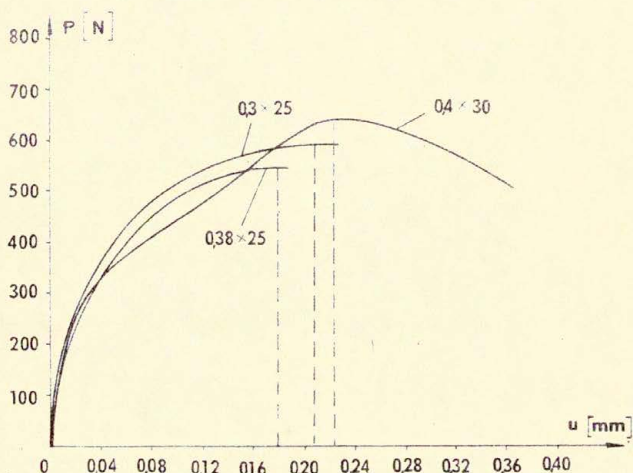
8. Zależność między przyczepnością a właściwościami mechanicznymi fibrobetonu.

Badania przyczepności włókien do matrycy cementowej przedstawione w poprzednich rozdziałach doprowadziły do dokładnego poznania tej ważnej i stosunkowo łatwo mierzalnej właściwości fibrobetonów. Celem tych badań było powiązanie wytrzymałości i odkształcalności elementów fibrobetonowych z przyczepnością nominalną otrzymaną w wyniku odpowiednio przeprowadzonych badań typu "pull-out". Do tego celu wykorzystano badania przyczepności włókien produkcji firmy Arbed 0,30 x 25 mm i 0,38 x 25 mm oraz włókien haczykowatych Bekaerta, 0,4 x 30 mm, /seria P-21/. Autor rozprawy przeprowadził porównania aby znaleźć zależności między zachowaniem się tych włókien w badaniach pull-out i elementów fibrobetonowych poddanych różnym obciążeniom.

Wyniki badań elementów fibrobetonowych poddanych czystemu zginaniu zostały uzyskane przez Babuta [8.1], a bezpośredniego rozciągania przez - Kasperkiewicza [8.2]. Do tych wyników dołączono rezultaty badań udatności elementów fibrobetonowych przeprowadzone w Cement - och Betonginstitutet, /CBI/ w Sztokholmie [8.3]. Próbkę we wszystkich trzech grupach badań były wykonane w CBI, przy zachowaniu takiego samego składu matrycy i procentu uzbrojenia matrycy włóknami $\beta = 2,0\%$. Włókna były poddane magnetycznej linearyzacji. Próbkę z serii P-21, z których wyciągano pojedyncze włókna, miały analogiczny skład matrycy do próbek wykonanych w CBI, nie były one jedynie uzbrojone.

W tabeli 8.1 umieszczono obok wytrzymałości elementów wyznaczonych na podstawie maksymalnych obciążeń, także obliczone wartości energii zniszczenia U_z przy zginaniu. Jako energię zniszczenia przyjęto pole powierzchni pod krzywą obciążenie - ugięcie, ograniczone maksymalną wartością zarejestrowanej siły, /rys.8.1./ Praca sił zewnętrznych niezbędna do doprowadzenia do zniszczenia, jest jednym z najbardziej

charakterystycznych mierników własności elementów fibrobetonowych, gdyż pozwala na ocenę również stanu zarysowania, kiedy to włókna odgrywają decydującą rolę. Z tego powodu obliczenie pracy sił zewnętrznych zaproponowano ostatnio przez ACI jako jedną ze standartowych metod badania elementów fibrobetonowych [8.4]. Ograniczenie pola wykresu do wartości maksymalnej jest całkowicie konwencjonalne wobec technicznych trudności ścisłego określenia stanu zniszczenia w elementach fibrobetonowych i może być zastąpione np. przez określenie wartości ugięcia.



Rys.8.1. Przykładowe wykresy $P - u$, zarejestrowane podczas czystego zgninania, linia przerywana określa granicę do której obliczano energię zniszczenia.

W tabeli 8.1, zestawiono wyniki wyżej wymienionych badań elementów i włókien w sposób następujący:

- przyczepność nominalną τ , kolumna 2,
- wytrzymałość na rozciąganie /próbki wiorełkowe/ f_t^v kolumna 3,

- wytrzymałość na rozciąganie f_t^u /próbki prostopadłościenna/, kolumna 4,
- wytrzymałość na zgnianie f_b^u kolumna 5;
- energia zniszczenia przy zginaniu U_z , kolumna 6,
- udarność I kolumna 7.

Tabela 8.1. Zestawienie przyczepności nominalnej z wielkościami charakteryzującymi wytrzymałość fibrobetonu.

Typ i wym. włókna [mm]	Pull-out	Rozciąganie		Zginanie		Udarność
	τ [MPa]	f_t^u [MPa]	f_t^u [MPa]	f_b^u [MPa]	U_z [Nmm]	I [KJ/m]
0,3x25	3,2	-	6,3	20,2	44,3	34,1
0,38x25	2,8	8,6	5,5	20,8	33,2	31,8
0,4x30	3,4	9,8	6,4	23,7	47,4	40,8

Zestawione wyniki wskazują, że większa przyczepność nominalna odpowiada wyższej wytrzymałości na zginanie i rozciąganie, co więcej obliczone wartości energii zniszczenia w elementach zginanych również odpowiadają wynikom wyciągania pojedynczych włókien. Oznacza to, że przyczepność nominalna τ jest dobrym miernikiem charakteryzującym nie tylko połączenie włókno-matryca ale również cały kompozyt.

Dalej próba porównania zachowania się włókien wyciąganych z matrycy oraz włókien w elemencie kompozytowym polegała na obliczeniu nośności pojedynczego włókna w przekroju elementu, w którym nastąpiło zniszczenie. Obciążenia odpowiadające zniszczeniu wzięto z badań [8.1] i [8.2], przy czym liczbę włókien w przekroju uzyskano bezpośrednio je zliczając po zakończeniu badania. Uzyskane stąd wartości naprężeń nominalnych zestawiono w tabeli 8.2, w sposób następujący:

- kolumna 2, τ z badań wyciągania włókien,
- kolumna 3, τ^* z badań belek zginanych,
- kolumna 4, τ'' z badań próbek rozciąganych.

Tabela 8.2. Zestawienie przyczepności nominalnych z badań wyciągania pojedynczego włókna oraz z badań elementów zginanych i rozciąganych.

Typ i wymiary włókna [mm]	Pull-out	Zginanie	Rozciąganie
	$\bar{\tau}$ [MPa]	$\bar{\tau}^*$ [MPa]	$\bar{\tau}^{**}$ [MPa]
0,3x25	3,169	4,538	-
0,38x25	2,829	3,452	3,812
0,4x30	3,423	3,868	3,434

Porównując zestawiane wartości okazuje się, że z badań wyciągania włókien uzyskano wartości bardzo bliskie do wartości obliczonych na podstawie elementów zginanych i rozciąganych, co więcej w przypadku badania elementów zginanych uzyskano nawet częściową zgodność wyników w tym sensie, że większym wartościom $\bar{\tau}$ z badań pull-out odpowiadają większe wartości $\bar{\tau}^*$ z badań elementów. Nie uniknione rozbieżności np. w wynikach badań rozciągania są spowodowane rozrzutem w liczebności włókien w poszczególnych przekrojach oraz przyjęciem założeń upraszczających co do średniej nośności pojedynczego włókna, oraz co do rozkładu naprężeń w niszczonej przekroju.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że przyczepność nominalna jest dobrą miarą współpracy włókna z matrycą i że mimo pewnych drobnych różnic i rozrzutów może być przyjmowana jako wielkość obliczeniowa do projektowania elementów kompozytów, tak jak to zrobiono np. w pracach [8.5] i [8.6].

Prace cytowane w rozdziale 8.

- 8.1. R. BABUT, Wyniki badań elementów zginanych z fibrobetonu, praca niepublikowana, IPPT - PAN, 1978.
- 8.2. J. KASPERKIEWICZ, Wyniki badań elementów rozciąganych fibrobetonowych, praca niepublikowana, IPPT - PAN, 1977
- 8.3. Fiberbetong, Nordforsks projektkomitee for FRC - material, Delrapporter, Stockholm 1977.
- 8.4. ACI Commitet 544 - Measurements of properties of fiber reinforced concrete, ACI Journal, July 1978.
- 8.5. R. BABUT, A.M. BRANDT, J. KASPERKIEWICZ, Comportément des éléments en matériaux composites à matrice fragile sous les charges statiques après la fissuration, Symposium Polsko-Francuskie "Problèmes nonlinéaires dans la mécanique des milieux continus", Kraków, lipiec 1977.
- 8.6. R. BABUT, A.M. BRANDT, The method of testing and analysing of steel fibre reinforced concrete elements in flexure, RILEM Symposium, Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites, The Construction Press, 1978.

9. Wnioski

Przyczepność włókien do matrycy jest zjawiskiem odgrywającym zasadniczą rolę w mechanice kompozytów. Mimo licznych badań prowadzonych w dziedzinie kompozytów o matrycach żywicznych czy metalicznych, przeniesienie bezpośrednio metod i wyników do analizy fibrobetonów okazuje się niemożliwe, natomiast przegląd badań i ogólne wnioski dotyczące przebiegu zjawisk i metodologii pomiarów przedstawiono w rozdziale 2.

Metoda badania przyczepności zarówno włókien pojedynczych jak i w grupach i miara określająca przyczepność - naprężenie nominalne τ - zostały przez autora w toku eksperymentów sprawdzone i potwierdzone. Sama metoda określenia τ może być w sposób zasadniczy uproszczona, tak aby mogła być stosowana jako standartowa próba materiałowa.

Jak wynika z badań opisanych w rozdziale 5, wielkość siły wyrywającej włókno P_{max} nie zależy od prędkości wyciągania w granicach od 0,2 mm/min. do 20 mm/min. Również do obliczania τ nie potrzebna jest znajomość całego przebiegu odspojenia, a jedynie wartość siły wyrywającej. Do standartowych badań nie trzeba stosować zatem maszyn wytrzymałościowych, które dają możliwość rejestracji przebiegu całego badania ponieważ wystarczy zapewnić pewne i łatwe uchwycenie wyrywanego włókna oraz zarejestrować maksymalną siłę wyrywającą.

Aby móc właściwie ocenić wielkości uzyskiwane z badań konieczne jest przeprowadzenie co najmniej 10 eksperymentów dotyczących jednego badanego parametru. Mimo to, ze względu na niejednorodność matrycy /rys.3.1./, otrzymane wyniki mogą charakteryzować się dużymi rozrzutami.

Z badanych przez autora parametrów wpływających na przyczepność włókien stalowych do matrycy cementowej, stwierdzono istotny wpływ na wartość przyczepności nominalnej: wytrzymałości matrycy f_m /rozd.5.2./, procentu uzbrojenia matrycy β /rozd. 5.3 i 6.2/, i obróbki mechanicznej włókien /rozd.5.9./. Nie zaobserwowano natomiast wpływu na przyczep-

ność nominalną wieku matrycy jeżeli jest starsza niż 28 dni /rozd.5.4./, kierunku wyciągania włókien względem kierunku betonowania /rozd. 5.6./ oraz obróbki chemicznej włókien /rozd. 5.8./. Jak stwierdzono na podstawie badania włókien o różnej długości zakotwienia l_z /rozd.5.7./, niezależnie od wielkości l_z można przyjmować dla danego typu włókna stałą wartość przyczepności nominalnej τ . Z badań przyczepności w grupach /rozd. 6.2/, wynika, że niezależnie od tego czy osł włókna pokrywa się z kierunkiem działania siły czy też odchyłona jest od niej o kąt α przyczepność nominalna jest zawsze taka sama. Zmienia się jednak siła wyrwywająca, jak również energia potrzebna do wyciągnięcia włókna.

Ważnym stwierdzeniem z badań wpływu obróbki mechanicznej jest to, że przez zdeformowanie włókien uzyskuje się przede wszystkim zwiększenie energii potrzebnej do wyciągnięcia włókna przy tylko nieznacznym przyroście siły wyrwywającej /rys. 5.24 i rys. 5.25/. Okazało się również, że włókna zdeformowane przenoszą w procesie zarysowania ciągle tę samą siłę aż do rozwarcia rysy 6 + 10 mm, w zależności od typu włókna, mimo, że nastąpiło odspojenie od matrycy. Zalety tych włókien widać również z badań elementów fibrobetonowych. Wytrzymałość na zginanie, rozciąganie, udarność a także energia potrzebna do zniszczenia badanego elementu są zawsze wyższe w porównaniu z elementami, w których znajdują się włókna gładkie, /rozd.8/.

Zawarta w rozdziale 7 analityczna metoda opisu rozkładu naprężeń we włóknie i w strefie przejściowej włókno-matryca znalazła potwierdzenie w badaniach doświadczalnych. Na podstawie tych rozważań teoretycznych i eksperymentów, można uważać, że przyjmowanie równomiernego rozkładu naprężeń przyczepnościowych τ_p jest poprawne.

Przyjęta wielkość charakteryzująca przyczepność między włókniem a matrycą - przyczepność nominalna τ znajduje dobre odzwierciedlenie w badaniach elementów fibrobetonowych /rozd. 8./ i może być stosowana jako wielkość użyteczna w obliczaniu i wymiarowaniu konkretnych konstrukcji wykonanych

z fibrobetonu.

Cele jakie autor rozprawy sobie postawił podejmując badania zostały osiągnięte. Opracowano i sprawdzono dwie metody badania przyczepności, które pozwalają na uzyskanie powtarzalnych wyników. Zbadano i określono wartości przyczepności nominalnych τ dla różnych typów włókien, opracowano opis analityczny zjawisk zachodzących we włóknie i w strefie przejściowej włókno-matryca oraz wykazano bezpośredni związek przyczepności nominalnej τ z parametrami wytrzymałościowymi elementów fibrobetonowych.

Z rozprawy wynika, że określenie przyczepności włókien powinno być standartową próbą przy badaniu fibrobetonu. W tym celu konieczne jest stosowanie odpowiedniego znormalizowanego urządzenia do pomiaru siły wyrywającej włókno. Konieczne jest równocześnie prowadzenie dalszych badań nad znalezieniem ścisłych zależności między przyczepnością nominalną a wytrzymałością elementów fibrobetonowych. Tego rodzaju badania nie są jeszcze prowadzone w żadnym ze znanych ośrodków.

Załącznik 1.

Zestawienie serii przeprowadzonych badań.
Badania przyczepności pojedynczych włókien

Nr serii	Rodzaj badania i typ badanego włókna /producent, średnica, długość zakotwienia/.	Data betonowania próbek.
P - 1.	Badanie wpływu trawienia włókien 2% roztworem HCL, włókna IPPT 0,30. x 20 mm.	16.05.75.
P - 2.	Badanie pokrycia woskiem włókien jako środkiem antyadhezyjnym, włókna IPPT 0,40.x 30 mm.	8.08.75.
P - 3.	Badania przyczepności włókien gładkich, włókna IPPT 0,40 x 30 mm ,	27.10.75.
P - 4.	Badanie przyczepności włókien naginanych rzadko, włókna IPPT 0,40 x 30 mm.	4.11.75.
P - 5.	Badanie pokrycia pastą silikonową włókien jako środkiem antyadhezyjnym, włókna IPPT 0,40 x 30 mm.	11.11.75.
P - 6.	Badanie przyczepności włókien gładkich pokrytych na odcinku 10 mm od ścianki formy pastą silikonową, włókna IPPT 0,40 x 30 mm.	12.11.75.
P - 7.	Badanie wpływu odtłuszczenia włókien toluenem, włókna IPPT 0,40 x 30 mm.	16.12.75.
P - 8.	Badanie wpływu wibrowania próbek na przyczepność, włókna IPPT 0,40 x 30 mm.	24.12.75.

- P - 9. Badania wpływu długości zakotwie- 31.12.75.
 nia włókien na przyczepność, włókna
 IPPT 0,40 x 15 i 30 mm,
- P - 10. Badanie wpływu nagniatania włókien 8.01.76.
 na przyczepność, włókna IPPT gładkie
 i nagniatane gęsto 0,40 x 20 mm.
- P - 11. Badanie wpływu nagniatania włókien 13.03.76.
 na przyczepność, włókna IPPT gładkie
 i nagniatane gęsto 0,40 x 15 mm,
- P - 12. Badanie wpływu nagniatania włókien 18.03.76.
 na przyczepność, włókna IPPT gładkie
 i nagniatane gęsto, 0,40 x 20 mm.
- P - 13. Badanie wpływu nagniatania włókien 31.03.76r
 na przyczepność, włókna IPPT gładkie
 i nagniatane gęsto, 0,40 x 3 mm.
- P - 14. Badanie wpływu nagniatania włókien 8.04.76.
 na przyczepność, włókna gładkie
 i nagniatane gęsto, 0,40 x 15 mm.
- P - 15. Badania przyczepności włókien 13.12.76,
 dostarczonych przez Cement-och
 Betonginstitutet w Stockholmie,
 włókna Arbed gładkie, 0,30 x 12,5 mm
 i 0,38 x 12,5 mm.
- P - 16. Badania przyczepności włókien dos- 14.02.77.
 tarczonych przez Cement-och Beton-
 ginstitutet w Stockholmie, włókna
 Arbed gładkie, 0,38 x 12,5 mm i
 Bekaert haczykowane 0,40 x 15 mm.
- P - 17. Badanie wpływu uzbrojenia matrycy 10.03.77.
 na przyczepność, próbki o $\beta = 0\%$
 i $\beta = 2,0\%$, włókna zbrojące matry-
 ce te same co badane, włókna IPPT

0,50 x 20 mm.

- P - 18, Badanie wpływu uzbrojenia matrycy 17.03.77.
na przyczepność próbki o $\beta = 0,0\%$
i $\beta = 1,0\%$, włókna zbrojące ma-
trycę te same co badane, włókna
IPPT, 0,50 x 20 mm.
- P - 19, Badanie wpływu kierunku wyciągania 4.05.77.
włókien względem kierunku betono-
wania, kąt $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 90^\circ$, włókna
IPPT, 0,50 x 20 mm.
- P - 20, Badanie wpływu kierunku wyciągania 11.05.77.
włókien względem kierunku betono-
wania, kąt $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 45^\circ$, włókna
IPPT 0,50 x 20 mm,
- P - 21, Badanie przyczepności włókien dos- 19.05.77.
tarczonych przez Cement-och Betongin-
stitutet w Stockholmie włókna Arbed
gładkie, 0,30 x 12,5 mm i 0,38 x
12,5 mm, oraz włókna Bekaert
haczykowe 0,40 x 15 mm.
- P - 22, Badanie wpływu uzbrojenia matrycy 15.11.77.
na przyczepność, próbki o $\beta = 0,0\%$,
 $\beta = 0,36\%$, $\beta = 0,57\%$, i
 $\beta = 1,23\%$, włókna zbrojące matryce
te same co badane, włókna IPPT,
0,50 x 25 mm.
- P - 23, Badanie wpływu wieku matrycy na 23.11.77.
przyczepność, włókna IPPT 0,50 x
20 mm.

- P - 24. Badanie wpływu prędkości wyciągania włókna na przyczepność, prędkości: 0,02, 0,20, 2,00, 20,00 i 200,00 mm/min., włókna Arbed gładkie, 0,38 x 12,5 mm i Bekaert haczykowane 0,40 x 15 mm. 31.01.78.
- P - 25. Badanie wpływu wieku matrycy na przyczepność, włókna IPPT gładkie 0,50 x 15 mm, Arbed gładkie, 0,38 x 12,5 mm, Bekaert haczykowane, 0,40 x 15 mm. 3.02.78.
- P - 26. Badania wpływu długości zakotwienia na przyczepność, włókna IPPT gładkie o średnicy 0,40 i 0,45 i długości zakotwienia $l_z = 3,6,9,12,15,18,21$ i 24 mm. 6.10.78.

Badanie przyczepności włókien w grupach.

- G - 1. Badanie wpływu kąta między osią włókna a kierunkiem działania siły na przyczepność w grupach $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 30^\circ$, włókna IPPT gładkie, 0,50 x 20 mm. 18.08.77
- G - 2. Badanie wpływu procentu uzbrojenia w przekroju sztucznej rysy na przyczepność w grupach, $\beta = 0,36\%$, $\beta = 0,57\%$ i $\beta = 1,23\%$, oraz wpływu kąta między osią a kierunkiem działania siły, $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 30^\circ$, włókna IPPT gładkie, 0,50 x 20 mm. 15.11.77.

Załącznik 2.

Program wraz z instrukcją użycia do obliczenia $\tau_p(x)$ i $\sigma(x)$ na kalkulatorze SR-56 Texas Instruments.

CODING FORM ~ KODEFORM ~ FEUILLE DE PROGRAMMATION

SR-56

TITLE / TITEL / TITRE Obliczenie $\tau_p(x)$ i $\sigma(x)$ PAGE / SEITE / PAGE 1 OF / VON / DE 1

PROGRAMMIERER / PROGRAMMEUR				DATE / DATUM / DATE			
Loc. Adr.	Code Code	Key Taste	Comments Bemerkungen	Loc. Adr.	Code Code	Key Taste	Comments Bemerkungen
00	34	RCL		25	14	\times	
01	08	8		26	93	\div	
02	55	SUM		27	89	+	
03	05	5		28	01	1	
04	34	RCL		29	94	=	
05	05	5		30	20	$\frac{1}{x}$	
06	59	*PUSH	X	31	64	X	
07	54	\div		32	34	RCL	
08	34	RCL		33	07	7	
09	04	4		34	93	\div	
10	94	=		35	14	\times	
11	33	STO		36	94	=	
12	07	7	$\times/4$	37	94	+	
13	54	\div		38	32	\times	
14	34	RCL		39	52	(
15	05	5		40	34	RCL	
16	64	X		41	07	7	
17	02	2		42	14	\times	
18	64	X		43	54	\div	
19	34	RCL		44	52	(
20	02	2		45	01	1	
21	94	=		46	73	-	
22	33	STO		47	34	RCL	
23	06	6	$\times/4$	48	06	6	
24	93	\div		49	14	\times	
				50	34	RCL	

Registers
Register
Mémoires
0 00
1 50
2 52
3 k
4 H
5 X
6 $\times/4$
7 $\times/4$
8 ΔX
9 $\sigma(x)$
NOTES
ANMERKUNGEN
NOTES

USER INSTRUCTIONS ~ BENUTZER INSTRUKTIONEN ~ MODE D'EMPLOI

SR-56

TITLE / TITEL / TITRE Obliczenie $\tau_p(x)$ i $\sigma(x)$ PAGE / SEITE / PAGE 1 OF / VON / DE 1

STEP	PROCEDURE - PROCEDUR - PROCEDURE	ENTER	PRESS	DISPLAY
SCHRITT		EWGABE	BEFEHL	ANZEIGE
SEQUENCE		INTRODUIRE	APPUYER SUR	ATTACHAGE
1	Wczytaj program			
2	Wprowadź dane do pamięci	σ E. k. H	*CMS	
3	Wprowadzić $\Delta x \approx 0$	$\Delta x = 0.000000001$	STO 8	Δx
4	Uruchomić program		RST $\frac{1}{3}$	$\sigma(0)$
5	Wprowadzić szalone Δx	$\Delta x =$	STO 8	Δx
6	Uruchomić program		RST $\frac{1}{3}$	$\sigma(x_1)$
7	Odczyt $\sigma(x_2)$		RCL 9	$\sigma(x_2)$
8	Powtórzyć kroki 7:8 aż $x = L_2$			

Program do obliczania parametrów **H i k**, na kalkulatorze SR - 56 Texas Instruments.

CODING FORM ~ KODEFORM ~ FEUILLE DE PROGRAMMATION

TITLE / TITEL / TITRE Obliczanie parametrów H i k PAGE / SEITE / PAGE 3 OF / VON / DE

 SR-56

PROGRAMMER / PROGRAMMIERER / PROGRAMMEUR 2 DATE / DATUM / DATE

Loc. Adr. Code Code	Key Tests Touches	Comments Bemerkungen Commentaires	Loc. Adr. Code Code	Key Tests Touches	Comments Bemerkungen Commentaires	Loc. Adr. Code Code	Key Tests Touches	Comments Bemerkungen Commentaires
00	33	STO	25	04	4	50	34	RCL
01	04	4	26	64	X	51	06	6
02	84	+	27	34	RCL	52	84	+
03	01	1	28	06	6	53	34	RCL
04	94	=	29	53	)	54	04	4
05	64	X	30	43	X ²	55	74	-
06	52	(	31	64	X	56	34	RCL
07	34	RCL	32	34	RCL	57	04	4
08	04	4	33	03	3	58	20	1/2
09	13	lnx	34	64	X	59	53)
10	33	STO	35	34	RCL	60	93	1/
11	06	6	36	01	1	61	84	+
12	74	-	37	54	÷	62	34	RCL
13	34	RCL	38	02	2	63	04	4
14	04	4	39	54	÷	64	94	=
15	64	X	40	34	RCL	65	33	STO
16	34	RCL	41	00	0	66	05	5
17	06	6	42	54	+	67	41	1/5
18	94	=	43	34	RCL	68	42	RST
19	74	-	44	02	2	69	02	2
20	52	(	45	94	=	70	64	X
21	34	RCL	46	54	÷	71	34	RCL
22	06	6	47	52	(	72	02	2
23	74	-	48	02	2	73	54	÷
24	34	RCL	49	64	X	74	34	RCL

Registers Register Memoires	
0	G
1	E
2	L
3	U
4	S
5	S
6	U
7	H
8	k
9	d
NOTES ANMERKUNGEN NOTES	

USER INSTRUCTIONS ~ BENUTZER INSTRUKTIONEN ~ MODE D'EMPLOI

TITLE / TITEL / TITRE Obliczanie H i k PAGE / SEITE / PAGE 4 OF / VON / DE

PROGRAMMER / PROGRAMMIERER / PROGRAMMEUR 2 DATE / DATUM / DATE

 SR-56

STEP SCHRITT SEQUENCE	PROCEDURE - PROZEDUR - PROCEDURE	ENTER EINGABE INTRODUIRE	PRESS BEFEHL APPUYER SUR	DISPLAY ANZEIGE AFFICHAGE
1	Wczytać program			
2	Wprowadzić dane do pamięci	G, E, L, U, 8	CMS RST	
3	Uruchomić program		RST 1/5	g
4	Uruchomić program	g	1/5	g, 1
5	Powtórzyć krok 5 aż do chwili gdy g = g, 1			
6	Uruchomić drugą część programu		GTO 22 1/5	k
7	Odczytaj parametry H		RCL 0	H

Spis treści

1. Wstęp	
1.1. Cel i zakres pracy	3
1.2. Zestawienie podstawowych pojęć i definicji	7
Prace cytowane w rozdziale 1.	
2. Zjawiska przyczepności w różnych materiałach kompozytowych.	10
2.1. Badania przyczepności w żelbecie i struno- betonie.	11
2.2. Badania przyczepności włókna w kompozytach o matrycach bezcementowych	19
Prace cytowane w rozdziale 2	23
3. Badania mikroskopowe styku włókno-matryca w fibrobetonie	25
Prace cytowane w rozdziale 3	33
4. Metodologia badań przyczepności włókien stalow- wych do matrycy betonowej	
4.1. Opis metod stosowanych do badania przyczep- ności włókien w fibrobetonie.	34
4.2. Opis przyjętej metody badania przyczepności pojedynczego włókna.	38
4.3. Opis przyjętej metody badania przyczepności włókien w grupach	45
Prace cytowane w rozdziale 4	52
5. Badania przyczepności pojedynczych włókien	
5.1. Program badań	54
5.2. Wpływ wytrzymałości matrycy	54
5.3. Wpływ procentu uzbrojenia matrycy	58
5.4. Wpływ wieku matrycy	68

5.5. Wpływ prędkości wyciągania włókna z matrycy	77
5.6. Wpływ kierunku wyciągania włókien względem kierunku betonowania	81
5.7. Wpływ długości zakotwienia l_z na przyczepność	82
5.8. Wpływ obróbki chemicznej włókien	86
5.9. Wpływ obróbki mechanicznej włókien	89
Prace cytowane w rozdziale 5	95
6. Badania wyciągania grup włókien	
6.1. Wpływ kąta α między włóknami a siłą wyciągającą	97
6.2. Wpływ procentu uzbrojenia w przekroju na przyczepność	102
7. Rozkład naprężeń we włóknie i w strefie przejściowej włókno-matryca.	
7.1. Wybór modelu teoretycznego	109
7.2. Wyprowadzenie równań opisujących rozkład naprężeń w strefie przejściowej włókno-matryca i we włóknie.	110
7.3. Określenie parametrów H i k w oparciu o badania przyczepności pojedynczych włókien	115
7.4. Przykłady wyznaczania rozkładu naprężeń $\tau_p(x)$ i $\sigma_{II}(x)$ z badań serii P-26	118
Prace cytowane w rozdziale 7	121
8. Zależność między przyczepnością a właściwościami mechanicznymi fibrobetonu	122
Prace cytowane w rozdziale 8	126
9. Wnioski	127
Załącznik 1.	130
Załącznik 2.	134

Bond strength between fibres and matrix in fibre reinforced cement composites

(Summary)

The paper is the integral text of the Doctor thesis presented at the Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences.

The thesis is dedicated to the problems of bond between fibres and cementitious matrix. In the paper following problems are discussed:

- methods of testing the bond strength between fibres and matrix,
- qualitative and quantitative correlations between nominal bond and various parameters of fibres and matrix,
- analytical model of the stress distribution in the interface between fibres and matrix,
- correlation between the bond strength and the strength of SFRC elements.

Listed below are the principal topics in consecutive chapters of the paper.

Chapter 1. - Introduction, scope and the purpose of the work.

Chapter 2. - Problems of bond in different composite materials including the methods of testing in reinforced and prestressed concrete, also in metal and resin matrix composites.

Chapter 3. - Microscopic observations of the interfacial fibre-matrix zone in SFRC.

Chapter 4. - Methods for the bond testing in the fibre reinforced concrete. Description of test methods used by various investigators and the test methods developed by the author.

Chapter 5. - Single fibre pull-out test. The tests have shown that the matrix strength (5.2), matrix reinforcement (5.3) and surface indentations of the fibres (5.9) have significant influence on the nominal bond. On the contrary, the influence of

the age of matrix after 28 days (5.4), of pull-out velocity (5.5), of orientation of fibre during casting (5.6), of bond length (5.7) and of chemical treatment (5.7) are of secondary importance.

Chapter 6. - Group pull-out tests. The tests have demonstrated that angle between direction of the pull-out force and the fibre axis has no influence on nominal bond τ , but it changes the pull-out force and the pull-out work (6.1). The percentage of reinforcement in the tested cross-section and also the matrix reinforcement significantly influence the group nominal bond (6.2). The same conclusion has been obtained after the single fibre bond tests (5.3).

Chapter 7. - Stress distribution in the fibre and in the interfacial region between fibre and matrix. The stress distribution has been found by assumption of pull-out of a prismatic elastic rod from the matrix. Between the fibre and the matrix only the shearing stress exists $\tau_p(x) = -k u(x)$. Using this assumption the shearing stress is found out from the equation 7.2. Using the results from test series P-26 the distribution of τ and σ along the fibre are determined.

Chapter 8. - Corelation between bond stress τ and the mechanical properties of steel fibre reinforced concrete are discussed. Comparing the nominal bond with tensile, bending and impact strength it is shown that better bond between fiber and matrix gives better strength of the composite elements.

Chapter 9. - In the conclusions the main relations between the observed parameters and the values of bond stress are discussed.